



TEKNIikka JA LIIKENNE

Kone- ja tuotantotekniikka

Koneautomaatio

INSINÖÖRITYÖ

JÄTEVEDENPUHDISTUSLAITOKSEN PAINEILMAJÄRJESTELMÄN KEHITTÄMINEN JA KUSTANNUSTEN SELVITTÄMINEN

Työn tekijä: Matti Koponen
Työn ohjaajat: Jari Savolainen
Kari Reinikainen

Työ hyväksytty: 17 . 5 . 2010

Jari Savolainen
lehtori

ALKULAUSE

Tämä insinöörityö on tehty Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymän Viikinmäen Jätevedenpuhdistuslaitokselle. Työn tarkoituksena oli tutkia laitoksen työpaineilman tuottamisen aiheuttamia kustannuksia ja kehittää paineilmajärjestelmän valvontaa.

Työssä on selvitetty jätevedenpuhdistuslaitoksen paineilmajärjestelmän rakenne ja kokonaiskustannukset sekä kehitetty järjestelmän mittauksia. Paineilmajärjestelmän mittausten kehitystarpeita selvitettiin laitoksen henkilökunnan avustuksella ja aikaisempien toteuttamatta jääneiden suunnitelmien perusteella. Paineilman tuottamisen kokonaiskustannuksiin päästin käsiksi selvittämällä paineilmalaitteiston kunnossapito ja energiakustannukset.

Haluan kiittää tuesta sekä neuvoista työtä tehdessä kunnossapitopäällikkö Kari Reinikais-ta, automaatioinsinööri Oskari Reipsarta, Viikinmäen Jätevedenpuhdistamon henkilökun-taa ja työn ohjaajaa tekniikan tohtori Jari Savolaista.

Helsingissä 11.5.2010

Matti Koponen

TIIVISTELMÄ

| | |
|--|--|
| Työn tekijä: Matti Koponen | |
| Työn nimi: Jätevedenpuhdistuslaitoksen paineilmajärjestelmän kehittäminen ja kustannusten selvittäminen | |
| Päivämäärä: 11.5.2008 | Sivumäärä: 35 s. + 9 liitettä |
| Koulutusohjelma: Kone- ja tuotantotekniikka | Suuntautumisvaihtoehto: Koneautomaatio |
| Työn valvoja: Jari Savolainen | |
| Työn ohjaaja: Kari Reinikainen | |
| <p>Tämä opinnäytetyö tehtiin Viikinmäen Jätevedenpuhdistuslaitokselle. Lähtökohtana olivat laitoksen kunnossapitopäällikön toive selvittää paineilmatuotantoon liittyvät käyttökustannukset ja ilmankulutuksen seuranta laitoksen eri osissa. Työn tavoitteiksi asetettiin työpaineilman kulutuksen seurantaan tarvittavien mittausten suunnittelu ja laitteiden hankinta, niiden asentaminen sekä työpaineilman tuottamisen kokonaiskustannusten selvittäminen.</p> <p>Raportin ensimmäisessä osassa on esitelty jätevedenpuhdistuslaitoksen paineilmajärjestelmä ja yleisesti käytössä olevien paineilman tuottamiseen ja käsittelyyn käytettyjen laitteiden toimintaperiaatteita. Työilman kulutuksen selvittämiseksi järjestelmään hankittiin ja asennettiin kaksi virtausmittaria. Mittausperiaatteeksi valittiin terminen massavirtausmittaus. Mittareiden hankintaan ja asennukseen liittyviä vaiheita on esitelty raportin seuraavassa osiossa.</p> <p>Käyttökustannukset koostuvat paineilmajärjestelmän ylläpito- ja energiakustannuksista. Käyttökustannusten selvittämiseksi kompressoreiden ja jälkikäsittelylaitteiston energiankulutus määritettiin mittauksien avulla. Paineilmajärjestelmän ylläpitokustannukset selvitettiin puhdistamon kunnossapidon toiminnanohjausjärjestelmän avulla.</p> | |
| Avainsanat: paineilmajärjestelmä, virtausmittaus, paineilmajärjestelmän talous | |

ABSTRACT

| | |
|---|---|
| Name: Koponen Matti | |
| Title: Development and Costs of Compressed Air System of Wastewater Treatment Plant | |
| Date: 11.5.2008 | Number of pages: 35 |
| Department: Mechanical Engineering | Study Programme: Machine Automation |
| Instructor: Savolainen Jari, lecturer | |
| Supervisor: Reinikainen Kari | |
| <p>This graduate study was originated by the desire of the maintenance chief of the wastewater treatment plant to define the costs of the compressed air system at the plant and to find out the compressed air consumption in different parts of the plant. The aim of the study was to design the necessary measurements in order to enable to monitor the consumption of compressed air, to purchase and install the necessary equipment and to figure out the overall costs of the compressed air system.</p> <p>The first part of this graduate study concentrates on general methods as to how compressed air is produced and processed. Also, the structure of the compressed air system of the wastewater treatment plant and different flow measuring solutions for gases are introduced in this part. The purchase and installation of the measuring devices is likewise presented in the first part of the study.</p> <p>The last part of the study concentrates on the costs of the compressed air system. The total costs of the system consist of the energy consumption of the compressor and the maintenance costs. Energy consumption was defined by necessary energy measurements and the maintenance costs were defined with the help of the ERP system of the maintenance of the plant.</p> | |
| Keywords: compressed air system, flow measuring, compressed air system economy | |

SISÄLLYS

ALKULAUSE

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

| | | |
|------------|--|-----------|
| 1 | JOHDANTO | 1 |
| 2 | JÄTEVEDENPUHDISTAMON PAINEILMAJÄRJESTELMÄ | 3 |
| 2.1 | Paineilmaverkoston rakenne | 3 |
| 2.1.1 | <i>Puhdistamon yleiskuvaus</i> | 3 |
| 2.1.2 | <i>Paineilmakeskuksen ja kompressoreiden sijainnit</i> | 3 |
| 2.1.3 | <i>Paineilmaverkko</i> | 4 |
| 2.1.4 | <i>Paineilman kulutuskohteet</i> | 5 |
| 2.2 | Paineilman tuottaminen ja käsittely | 5 |
| 2.2.1 | <i>Ruuvikompressorin toimintaperiaate</i> | 5 |
| 2.2.2 | <i>Kompressoriyksiköiden rakenne</i> | 7 |
| 2.2.3 | <i>Kompressoreiden ilmantuoton säätö ja ohjaus</i> | 8 |
| 2.2.4 | <i>Paineilman jälkikäsittely</i> | 9 |
| 2.2.5 | <i>Paineilmasäiliö</i> | 10 |
| 2.2.6 | <i>Paineenmittaus</i> | 10 |
| 3 | PAINEILMAJÄRJESTELMÄN KEHITTÄMINEN | 12 |
| 3.1 | Järjestelmän mittausten kehittäminen | 12 |
| 3.2 | Virtausmittaus | 12 |
| 3.2.1 | <i>Anturi, lähetin ja mittaussignaali</i> | 12 |
| 3.2.2 | <i>Paine-eroon perustuvat virtausmittarit</i> | 13 |
| 3.2.3 | <i>Pyörrevanavirtausmittaus</i> | 14 |
| 3.2.4 | <i>Coriolis-ilmiöön perustuva virtausmittaus</i> | 15 |
| 3.2.5 | <i>Termiset mittausmenetelmät</i> | 15 |
| 3.3 | Virtausmittareiden valinta | 16 |
| 3.3.1 | <i>Laitevalmistaja</i> | 17 |
| 3.3.2 | <i>Olosuhteet</i> | 17 |
| 3.3.3 | <i>Mittareiden asennusmalli</i> | 17 |
| 3.3.4 | <i>Terminen massavirtausmittari Proline t-mass 65I</i> | 18 |
| 3.4 | Mittareiden asennus | 19 |
| 3.4.1 | <i>Mittauspisteiden valinta</i> | 19 |
| 3.4.2 | <i>Mekaaniset työt</i> | 19 |
| 3.4.3 | <i>Kytkenä</i> | 21 |
| 3.4.4 | <i>Ohjelmointi</i> | 22 |
| 3.4.5 | <i>Prosessikuvan päivitys</i> | 23 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4 | TYÖPAINEILMATUOTANNON ENERGIANKULUTUKSEN TUTKIMINEN | 23 |
| 4.1 | Paineilman energiankulutus | 24 |
| 4.1.1 | <i>Paineilman exenergia</i> | 24 |
| 4.1.2 | <i>Kompressorin hyötysuhde ja energiankulutus</i> | 25 |
| 4.1.3 | <i>Jälkikäsitteilylaitteiden energiankulutus</i> | 25 |
| 4.1.4 | <i>Paineilmajärjestelmän häviöt</i> | 26 |
| 4.2 | Työpaineilman tuottamisen energiankulutuksen selvittäminen | 27 |
| 4.2.1 | <i>Mittausten suorittaminen</i> | 27 |
| 4.2.2 | <i>Kokonaiskulutuksen arviointi</i> | 29 |
| 5 | JÄRJESTELMÄN KOKONAISTALOUS | 30 |
| 5.1 | Käyttökustannukset | 30 |
| 6 | YHTEENVETO | 32 |
| 6.1.1 | <i>Virtausmittauksen toteutus</i> | 32 |
| 6.1.2 | <i>Kokonaistalous</i> | 33 |
| | VIITELUETTELO | 34 |
| | LIITTEET | |

Liite 1. Jätevedenpuhdistuslaitoksen kartta

Liite 2. Paineilmaverkon rakenne

Liite 3. Kompressoreiden tekniset tiedot

Liite 4. Terminen massavirtausmittari Proline t-mass 65l

Liite 5. Virtausmittareiden kytkennät

Liite 6. Virtausmittareiden ohjelmat

Liite 7. Työilman tuoton prosessikuva

Liite 8. Kompressorin 1 ohjaus

Liite 9. Paineilmatuotannon kustannusten määrittäminen

1 JOHDANTO

Viikinmäen Jätevedenpuhdistamo on yksi Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymän omistama jätevedenpuhdistamo. Viikinmäen puhdistamo on Suomen suurin kunnallinen jätevedenpuhdistamo huolehtien viemärointi-alueensa noin 780 000 asukkaan ja teollisuuden jätevesien puhdistuksesta. Puhdistamolle tulevasta jätevedestä noin 85 % on yhdyskuntajätevesiä ja 15 % teollisuusjätevesiä. Vuorokausivirtaama puhdistamolla on noin 270 000 m³/d ja puhdistettua jätevettä syntyy keskimäärin 100 milj. m³ vuodessa. Laitos otettiin käyttöön vuonna 1994, ja se on rinnakkaissaostusperiaatteella toimiva aktiivilietelaitos, missä jätevedet puhdistetaan mekaanisesti, kemiallisesti ja biologisesti. [1, s. 4.]

Työn lähtökohtana oli laitoksen kunnossapitopäällikön toive selvittää työpaineilmatuotantoon liittyvät käyttökustannukset ja ilmankulutuksen seuranta laitoksen eri osissa. Insinööriyön tavoitteiksi asetettiin työpaineilman kulutuksen seurantaan tarvittavien mittausten suunnittelu ja laitteiden hankinta, niiden asentaminen sekä työpaineilman tuottamisen kokonaiskustannusten selvittäminen.

Raportin ensimmäisessä osassa keskityttiin selvittämään laitoksen paineilmaverkon rakenteeseen ja toimintaan liittyviä asioita, koska työn ollessa suurimmaksi osaksi kehitys- ja tutkimustyötä oli järjestelmän tunteminen hyvin oleellista. Järjestelmän tutustumisen yhteydessä käydään läpi myös paineilman tuottamiseen käytettävien laitteiden toimintaperiaatteita ja paineilmaverkon rakenteisiin vaikuttavia tekijöitä.

Paineilman kulutuksen seuranta vaati järjestelmän mittausten parantamista. Verkoston paineenmittauksen lisäksi tarvittiin virtausmittaus, minkä avulla päästäisiin käsiksi ilman kulutukseen. Virtausmittareiden hankinta aloitettiin selvittämällä järjestelmän piirustusten, kirjallisuuden ja alan ammattilaisten avulla parhaiten olosuhteisiin soveltuvat mittausmenetelmät ja mittareiden sijoituskohteet.

Insinööriyön raportin jälkimmäisessä osiossa keskitytään työilmantuotannon käyttökustannusten tutkimiseen, jotka koostuvat paineilmajärjestelmän ylläpito- ja energiakustannuksista. Ylläpitokustannukset muodostuvat paineilmaverkoston kunnossapito- ja varaosakustannuksista, joiden selvittäminen

suoritettiin laitoksen kunnossapidon toiminnanohjausjärjestelmän ja henkilökunnan avustuksella. Energiakustannukset taas syntyvät pääasiallisesti kompressoreiden ja paineilman jälkikäsitteilylaitteiston energiankulutuksesta, jonka selvittämiseksi suoritettiin tarvittavat mittaukset kaikille laitoksen työilman tuottamiseen osallistuville kompressoreille.

2 JÄTEVEDENPUHDISTAMON PAINEILMAJÄRJESTELMÄ

Paineilmaa käytetään voimanlähteenä laajalti kaikkialla teollisuudessa, sen turvallisuuden ja helppokäyttöisyyden johdosta. Paineilman käytön laajuuteen vaikuttaa myös pneumaattisten laitteiden alhaisempi hankintahinta verrattuna hydraulisiin tai sähkökäyttöisiin laitteisiin. Sen etuihin voidaan lukea myös huollon ja ylläpidon yksinkertaisuus.

2.1 Paineilmaverkoston rakenne

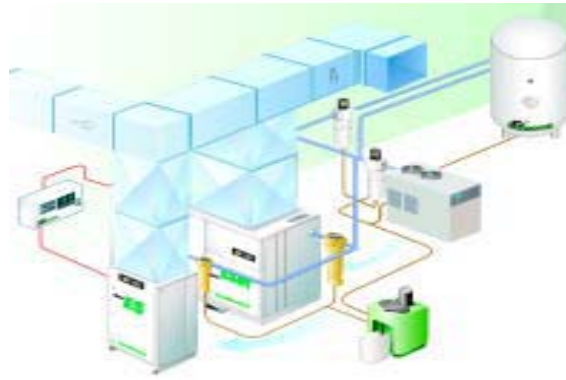
Paineilmaverkosto rakentuu yleensä kompressorista, paineilman jälkikäsittelystä, paineilmasäiliöstä, putkistosta ja käyttökohteiden liitännöistä, joita voivat olla erilaiset venttiilit, liittimet, toimilaitteet ja huoltoyksiköt.

2.1.1 Puhdistamon yleiskuvaus

Viikinmäen Jätevedenpuhdistamo koostuu kahdesta erillisestä maanpäällisestä rakennuksesta, mädättämöistä ja luolastosta. Maanpäällisissä rakennuksissa sijaitsevat laitoksen varastot, kone-, sähkö- ja automaatiokorjaamot sekä energia-asema. Rakennusten alapuolella olevassa luolastossa taas tapahtuu varsinainen jäteveden puhdistus. Luolasto on jaettu neljään prosessialueeseen. Näitä ovat esikäsittely, vesiasema, lietteenkäsittely ja suodatinlaitos. Esikäsittely koostuu tulopumppaamosta, hiekanerotuksesta ja esiselkeytyksestä. Vesiasemaan sisältyy esi-ilmastus, ilmastus ja jälkiselkeytys. Lietteen käsittely käsittää taas lietteenkuivaamon ja mädättämöt. Näiden neljän prosessialueen lisäksi luolastossa sijaitsee myös erilaisia varastoja ja laitetiloja. Puhdistamon ja luolaston kartta on esitetty liitteessä 1.

2.1.2 Paineilmakeskuksen ja kompressoreiden sijainnit

Paineilmakeskus muodostuu erillisestä huoneesta tai osasta muuta tilaa, jossa sijaitsevat useimmat seuraavista laitteista: kompressorit, ilmasäiliöt, jäähdytyskuivaimet, suodattimet, puhaltimet, sähkökaapit ja lämmöntalteenottolaitteet [2, s. 41]. Kuvassa 1 on esitetty tavanomainen paineilmakeskus, joka on varustettu kahdella kompressorilla, lämmöntalteenotolla, paineilmasäiliöllä, suodattimilla ja jäähdytyskuivaimella.



Kuva 1. Paineilmakeskus [3]

Puhdistamon työilma tuotetaan paineilmakeskuksessa B110, joka sijaitsee laitoksen energia-aseman ensimmäisessä kerroksessa, ja energia-aseman alapuolella sijaitsevassa lietteenkäsittelyn laitetilassa L309. Paineilmakeskus on varustettu kolmella kompressorilla ja jälkikäsittelylaitteistolla. Laitetilassa sijaitsee yksi kompressorin ja jälkikäsittelylaitteisto.

Näiden neljän kompressorin lisäksi paineilmaverkkoon on liitetty esikäsittelyn laitetilassa G503 sijaitsevat kaksi kompressorin. Koneiden pääasiallinen käyttötarkoitus on kuitenkin tuottaa ilmaa kalkinsiirtoon ja rejektiveden pilottilaitteiston tarpeisiin, mutta niitä voidaan myös käyttää erikoistilanteissa laitoksen työilman tuottamiseen.

2.1.3 Paineilmaverkko

Jokainen paineilmaverkko on periaatteessa yksilöllinen. Tärkeiksi tekijöiksi muodostuvat siirtoetäisyydet, kulutuskohteiden jakautuminen ja niiden tarvitsemat ilmamäärät. Paineilmakeskuksesta paineilma johdetaan syöttöputkella runkoputkeen, josta ilma johdetaan jakeluputkella laitteiden ja työkalujen liitäntöihin. [2, s. 59.] Paineilmaverkoston rakenne voi olla periaatteessa

- suora verkko
- rengasverkko
- edellisten yhdistelmä.

Jätevedenpuhdistamon paineilmaverkko on rakenteeltaan suoran- ja rengasverkon yhdistelmä. Laitoksen paineilma tuotetaan siis energia-asemalla ja lietteenkäsittelyssä sijaitsevilla kompressoreilla. Verkostoon tuotettava

käyttöpaine on 6.8 bar. Kompressorihuoneesta ja laittilan yksittäisestä kompressorista paineilma johdetaan syöttöputkella luolaston pääkäytävällä sijaitsevaan runkoputkeen, voima-asemalle ja lietteenkäsittelyyn. Pääkäytävältä M7 paineilma jaetaan jakeluputkilla mädättämisölle M1 - M4, pääkäytävän vieressä sijaitseviin laittiloihin, rakennukseen A ja käytäville E3 - E6, josta ilma jaetaan esikäsittelyyn, tulopumppaamoon ja allashalleille. Rakennukseen A menevällä jakeluputkella paineilma siirretään sähkö-, automaatio- ja konekorjaamoille. Rakennuksesta A putkisto jatkaa matkaansa rakennukseen B, missä se yhdistyy takaisin syöttöputkeen. Paineilmaverkoston rakenne on esitetty liitteessä 2.

2.1.4 Paineilman kulutuskohteet

Rakennuksessa A sijaitsevilla korjaamoilla paineilmaa käytetään periaatteessa vain paineilmatyökaluihin. Luolastossa on myös muutamia pieniä korjaamoja, joissa käytetään paineilmatyökaluja, mutta siellä pääasiallisia paineilman kulutuskohteita ovat erilaisten venttiilien pneumaattiset toimilaitteet, sylinterit ja instrumentointi. Rakennuksessa B sijaitsevalla energia-asemalla paineilmaa käytetään paineilmatyökaluihin ja muutamien venttiilien toimilaitteiden ohjaamiseen.

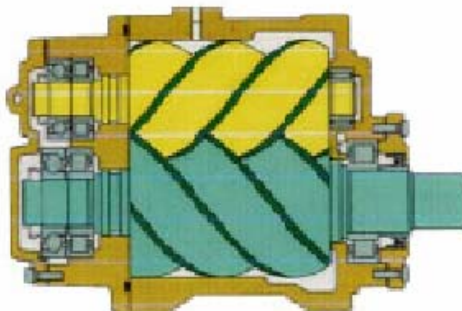
2.2 Paineilman tuottaminen ja käsittely

Jätevedenpuhdistuslaitoksella työilman tuottamiseen käytettävät kompressorit ovat öljyvoideltuja ruuvikompressorisyksiköitä ja paineilman jälkikäsittelyyn laitoksella käytetään jäähdytyskuivaimia sekä veden- ja öljynerottimia.

2.2.1 Ruuvikompressorin toimintaperiaate

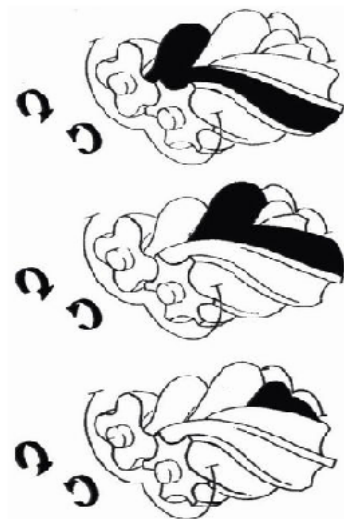
Ruuvikompressorin toimintaperiaate kehitettiin jo vuonna 1930. Ruuvikompressorilla saavutetaan pyörivillä roottoreilla tasainen tuotto ja suurehko tilavuusvirta eri kuormitusolosuhteissa. Ruuvikompressorilla tuotettu paineilma oli alkuvaiheessa öljytöntä, mutta nykyään kompressorit ovat yleensä voideltuja, jolloin päästään korkeampiin painesuhteisiin. [2, s. 44–46.]

Ruuvisyksikkö muodostuu ruuvi- ja luistiroottoreista, jotka ovat rynnössä keskenään. Roottoreita ympäröi kompressorin runko. [2, s. 44.] Kuvassa 2 on esitetty suoratoimisen ruuvisyksikön rakenne.



Kuva 2. Suoratoiminen ruuviyksikkö [4]

Roottorit imevät ilmaa uriin rungossa olevan imuaukon kautta. Roottorin pyöriessä yhteys imuaukkoon sulkeutuu. Pesän ja roottorien välinen tila pienenee pyörimisen edetessä ja ilma johdetaan paineaukkoon, kun toiminnan kannalta taloudellisin paine on saavutettu. Kullakin ruuviyksiköllä on kiinteä painesuhde, joka riippuu ruuvien noususta ja pituudesta sekä paineliitännän muodosta. Ruuvit olivat alun perin symmetrisiä, mutta nykyisin on käytössä epäsymmetrisiä profiileja. Myös ruuvi- ja luistiroottoreiden urien ja harjojen lukumäärä voi vaihdella. Usein käytetään neliharjaisen ruuvien ja kuusiuraisen luistin yhdistelmää. [2, s. 45–46.] Ilman kulku neliharjaisessa ja kuusiuraisessa ruuviyksikössä on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. Ilman puristus ruuviyksikössä [4]

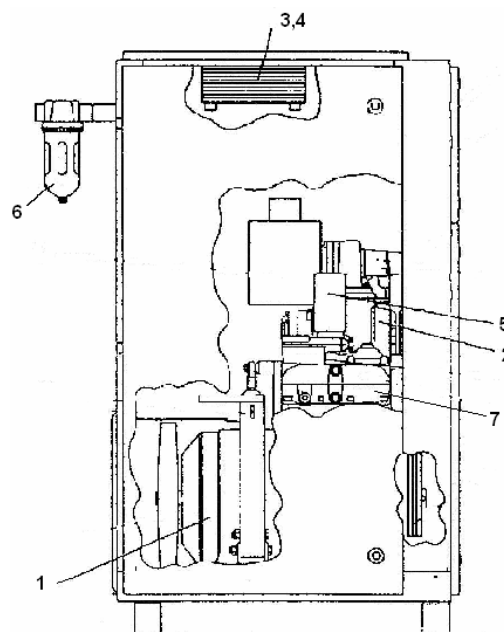
Öljyttömissä ruuvikompressoreissa paineilma tuotetaan vaiheittain, koska ilman puristuksen aiheuttama lämpötilan nousu rajoittaa ruuviyksikön toimintaa ja painesuhdetta. Näissä kaksivaiheisissa kompressoreissa ilma

puristetaan ensimmäisessä ruuviyksikössä välipaineeseen, minkä jälkeen se jäähdytetään. Jäähdytyksen jälkeen ilma siirtyy toiseen ruuviyksikköön, jossa se puristetaan haluttuun loppupaineeseen. Voidellussa ruuvikompressorissa ilman jäähdytys taas tapahtuu ruuviyksikössä. Ruuviyksikköön tulevan ilman sekaan ruiskutetaan öljyä, joka jäähdyttää puristettavaa ilmaa ja ruuviyksikköä. Tämän lisäksi se voitelee laakerit, tiivistää ruuviyksikön ja pienentää sisäisiä ilmavuotoja.

2.2.2 Kompressoriyksiköiden rakenne

Laitoksen työilman tuottamiseen käytetään paineilmakeskuksessa sijaitsevia kompressoreita 1 ja 2, sekä lietteenkäsittelyn laitetilassa sijaitsevaa kompressoria 3. Kompressorit on valmistanut Tamrock. Koneet ovat öljyjäähdytteisiä yksivaiheisia ruuvikompressoreita ja ne on varustettu öljynerotussäiliöllä, vedenerottimilla ja paineilman ja öljyn jäähdyttimillä. Kompressorien periaatteellinen rakenne ja osien sijainti on esitetty kuvassa 4.

1. sähkömoottori
2. ruuviyksikkö
3. öljynjäähdytin
4. ilmanjäähdytin
5. öljynsuodatin
6. vedenerotin
7. öljynerotussäiliö



Kuva 4. Tamrock-kompressoreiden rakenne [5]

Rakenteeltaan ja toiminnaltaan kaikki kolme kompressoria ovat samanlaisia, vaikka lietteenkäsittelyssä sijaitseva kompressori on kahta muuta konetta hieman pienempi. Kompressorien tarkemmat tekniset tiedot on esitetty liitteessä 3.

Paineilmakeskuksessa olevan kolmannen kompressorin on valmistanut Atlas Copco. Kompressorin on, kuten muutkin kompressorit, voideltu ruuvikompressorin. Kone on muita kompressoreita huomattavasta pienempi ja sen käyttötarkoitus on toimia paineilma-verkon varakompressorina. Kompressorin tekniset tiedot on myös esitetty liitteessä 3.

2.2.3 *Kompressoreiden ilmantuoton säätö ja ohjaus*

Säätöjärjestelmän tehtävä on säätää kompressorin ilmantuotto ilmantarpeen mukaan ja saada tehontarve tuotettua ilmakuutiota kohden mahdollisimman alhaiseksi [6]. Kompressorin ilmantuoton säädön suorittaa elektroniikkayksikkö, jolla ohjataan kevennyspaineen toimintaa, tuottopaineen kytkemistä uudelleen ja kevennysaikaa ennen pysähtymistä. [2, s. 49–50.] Säätötapoja on erilaisia ja ne vaihtelevat kompressorin valmistajan mukaan. Seuraavassa on esitetty laitoksen kompressoreissa käytössä olevat säätötavat.

Kompressorin käy täydellä teholla

Kompressorin käydessä täydellä tuotolla ruuviyksikön imuventtiili on avoinna ja kompressorin tuottaa ilmaa.

Kompressorin käy kevennyksellä

Kompressorin käydessä kevennyksellä imuventtiili on kiinni eikä kompressorin tuota ilmaa, mutta on kuitenkin toiminnassa.

Start-stop -automaatiikka

Mikäli paineilmaa ei tarvita, kompressorin käy kevennyksellä ja pysähtyy automatiikan ohjaamana säädetyin ajan kuluttua. Kun verkoston paine laskee säädetyin paineen alapuolelle, käynnistyy kompressorin automaattisesti uudestaan. [5.]

Laitoksen työilman tuotto on käynnissä jatkuvasti ja kompressoreiden käyntijärjestystä ohjaa automaattisesti käyntijärjestyksen valintakeskus. Kompressorit käyvät tuottavana koneena vuorollaan viikon ajan, jos tuottava kompressorin jostain syystä pysähtyy tai verkoston paine putoaa liian alhaiseksi, niin yksi lepo vuorossa olevista koneista käynnistyy automaattisesti.

2.2.4 Paineilman jälkikäsittely

Paineilmassa esiintyy aina erilaisia epäpuhtauksia, joita kulkeutuu ilman joukkoon kompressorin ottamasta imuilmasta ja itse kompressorista. Paineilmajärjestelmään kulkeutuu pieniä kiinteitä hiukkasia, öljyä ja vettä.

Öljyvoidelluista kompressoreista kulkeutuu aina öljyä paineilmajärjestelmään. Öljynmäärät ovat pieniä, eikä niillä ole usein suoranaisia haittavaikutuksia käyttökohteissa. Kompressoreissa olevilla suodattimilla saadaan poistettua suurin osa öljystä, mutta tarvittaessa täysin öljytöntä paineilmaa täytyy se tuottaa öljyttömällä kompressorilla. Öljy esiintyy paineilmassa nesteinä, sumuna ja kaasuna. Suodattamisessa käytetään kolmea erilaista tekniikkaa: mekaanista suodatusta, yhdistymissuodatusta ja adsorptiosuodatusta [2, s. 56]. Mekaanisessa suodatuksessa öljyn eteneminen pysäytetään verkolla tai rei'illä, joiden koko on pienempi kuin öljypartikkelin. Yhdistymissuodatuksessa öljypisarat virtaavat suodattimessa eri kerrosten läpi, joissa on pieniä reikiä. Reikien koko kasvaa jokaisen kerroksen jälkeen, jolloin pisarat saadaan yhdistymään keskenään isommiksi ja valumaan suodattimen pohjalle, mistä paineilma ei jaksa enää kuljettaa niitä verkostoon. Adsorptiosuodatuksessa öljy poistetaan adheesion avulla ja sidotaan suodattimen pintaan. Öljyn puristuessa kompressorissa se muodostaa höyryä ja hiilivetyjä. Adsorptiosuodatuksella pystytään poistamaan kyseisiä höyryjä ja hiilivetyjä, mutta vain ja ainoastaan niitä. Suodatin vaatii toimiakseen eteensä tehokkaan yhdistymissuodatuksen ja ilmankuivaimen.

Puhdistamolla käytetään yhdistymissuodatusperiaatteella toimivia öljynsuodattimia. Kompressorihuoneessa suodattimia on kaksi kappaletta ja laite-tilassa yksi kappale. Kompressorihuoneen suodattimet on sijoitettu niin, että ensimmäinen suodatin on kompressoreiden ja jäähdytyskuivaimen välissä ja toinen sijaitsee jäähdytyskuivaimen perässä. Laitetilan suodatin on sijoitettu kompressorin ja paineilmasäiliön väliin.

Paineilmajärjestelmään kerääntyvä vesi muodostuu imuilmassa olevasta kosteudesta. Kompressorin puristuksen jälkeen ilmassa oleva kosteus on höyrymäisessä muodossa, koska sen lämpötila on noussut puristuksen aikana korkeammaksi. Kun ilman lämpötila alkaa kompressorin jälkeen järjestelmässä laskea, niin osa vesihöyrystä tiivistyy vedeksi. Vesi on paineilmajärjestelmässä olevista epäpuhtauksista kaikista ongelmallisin. Se aiheuttaa

putkiston, varusteiden ja laitteiden ruostumista. Kosteuden poistamiseksi paineilmaasta käytetään jälkijäähdyttimiä, jäähdytyskuivaimia ja suodattimia.

Jätevesipuhdistuslaitoksella paineilman kuivaamiseen käytetään jäähdytyskuivaimia, joiden toiminta perustuu lämpötilan madaltamiseen, jolloin saadaan ilmassa oleva kosteus tiivistymään vedeksi. Jäähdytyskuivain rakentuu kahdesta erillisestä kiertopiiristä, joissa toisessa kulkee kuivattava ilma ja toisessa kylmäaine. Paineilma jäähdytetään kylmäaineen avulla aluksi lämmönvaihtimessa noin $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$:seen, jolloin suurin osa ilmassa olevasta kosteudesta tiivistyy vedeksi ja erottuu vedenerottimeen. Tämän jälkeen paineilma lämmitetään uudelleen ja syötetään verkostoon. Verkostossa paineilman lämpötila voi siis laskea takaisin $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$:seen, mutta vettä ei enää tiivisty verkkoon, koska se on tiivistynyt jo aikaisemmin jäähdytyskuivaimeen.

2.2.5 Paineilmasäiliö

Paineilmajärjestelmä voidaan toteuttaa myös ilman paineilmasäiliötä, mutta sen käyttö on suositeltavaa. Paineilmasäiliö toimii järjestelmän paineilmarastona, jolloin se tasaa ja vaimentaa kulutushuippuja ja paineenvaihteluja. Se toimii myös järjestelmän vedenerottimena ja ilman jäähdyttäjänä. [2, s. 61.]

Jätevedenpuhdistuslaitoksella käytetään kolmea työilmanpainetta tasaavaa paineilmasäiliötä. Nämä sijaitsevat lietteenkäsittelyn laitetilassa olevan kompressorin vieressä, esikäsittelyssä olevien kompressoreiden perässä ja käytävällä E7 sijaitsevassa laitetilassa. Säiliöiden maksimi paine on 10 bar ja niiden tilavuus on 2 m^3 .

2.2.6 Paineenmittaus

Yksi prosessiteollisuuden tärkeimmistä mittakohteista on paine. Sen avulla voidaan mitata pinnankorkeutta, virtausta tai lämpötilaa. Painetta voidaan mitata mekaanisilla, nestetäytteisillä ja sähköisillä antureilla.

Laitoksella paineilma-verkoston paineen mittaamiseen käytetään mekaanisia antureita, jotka on varustettu painelähettimillä. Pinelähettimellä saadaan siirrettyä tieto verkoston paineesta automaatiojärjestelmään ja edelleen kompressoreille. Mittarit on sijoitettu paineilma-keskukseen ja lietteenkäsittelyn laitetilaan. Antureiden mittauseräimenä toimii Bourbon-kaari, mikä on yksi paineputken sovelluksista. Bourbon-kaari on kaarelle taivutettu litistetty put-

ki, jonka toinen pää on suljettu. Paineen kasvaessa kaaren sisällä putki oikeenee, ja paineen pienentyessä se käpristyy enemmän mutkalle. Kaaren liike on pieni, joten sen liike siirretään yleensä ratasvälityksen avulla osoitin-koneistolle laajemman asteikon aikaansaamiseksi. [7, s. 15.] Muita mekaanisia mittausten menetelmiä ovat paljeputket ja kalvorasiat.

Nestetäytteisissä antureissa paineen mittaamiseen käytetään avuksi usein nestepatsaan synnyttämää hydrostaattista painetta tai kahden nestepatsaan välistä korkeuseroa. Nestetäytteisiä antureita ovat

- u-putkimanometri
- uimurimanometri
- rengasvaaka.

Edellä mainitut paineanturit voidaan varustaa erillisellä sähköisellä muuntimella, joka muuntaa anturin antaman liikkeen tai voiman sähköiseksi suureeksi [8, s. 29]. Sähköiset paineanturit ovat niin sanottuja liike-sähkömuuntimia. Liike-sähkömuuntimia ovat esimerkiksi

- potentiometri
- venymäliuska-anturi
- pietsoresistiivinen anturi
- kapasitiivinen anturi.

Painelähettimellä varustetun anturin mittaama paine muunnetaan sähköiseen muotoon tällaisen liike-sähkömuuntimen avulla. Mittauselimeen eli esimerkiksi Bourbon-kaareen on kiinnitetty venymäliuska-anturit, joilla kaaren liike pystytään muuntamaan sähköiseksi tiedoksi, jolloin se voidaan lähettää eteenpäin automaatiojärjestelmään. Venymäliuska itsessään on ohut liuska, johon on kiinnitetty metallilangasta tai foliosta tehty vastus. Liuskan venyessä myös lanka tai folio venyy, mikä aiheuttaa vastuksen resistanssin suurenemisen ja sähköisen arvon muuttumisen.

3 PAINEILMAJÄRJESTELMÄN KEHITTÄMINEN

3.1 Järjestelmän mittausten kehittäminen

Laitoksen paineilmajärjestelmän kehityksessä keskityttiin järjestelmän valvonnan ja mittausten parantamiseen. Aikaisemmin järjestelmän valvonta ja mittaukset rajoittuivat vain paineenmittaukseen. Paineenmittauksen lisäksi laitoksella nähtiin aiheelliseksi aloittaa paineilman kulutuksen seuranta, mikä tapahtui asentamalla verkostoon kulutusta seuraavat virtausmittarit. Seuraavissa kappaleissa käydään läpi kaasujen virtausmittaukseen yleisesti käytettäviä mittausten menetelmiä ja laitoksen virtausmittauksen toteuttamista.

3.2 Virtausmittaus

Teollisuudessa käytetyistä mittausten menetelmistä virtausmittauksille on eniten tarjolla erilaisia mittaus tapoja. Kaasuille, nesteille ja nesteille, jotka sisältävät kiintoainetta, löytyy kullekin omat mittausten menetelmät ja mittarit.

3.2.1 Anturi, lähetin ja mittaus signaali

Mittausjärjestelmä rakentuu anturista, signaalin muodostuksesta, siirrosta ja sen käsittelystä. Anturilla tarkoitetaan prosessin mittauksissa laitetta, joka muuntaa mitattavan prosessisuureen siihen jollakin tavoin verrannolliseksi suureeksi, esimerkiksi liikkeeksi, voimaksi, jännitteeksi tai resistanssiksi [9, s. 17]. Anturi sisältää lähtimen ja mittaus- tai tuntoelimen, joka on välittömässä yhteydessä mitattavaan suureen. Lähetin taas muuntaa anturin antaman suureen mittausviestiksi ja lähettää sen automaatiojärjestelmään.

Instrumentointi perustuu standardiviestien käyttöön, jolloin mittausviesti on lähes aina 4 - 20 mA:n tasavirta signaali. Tasavirta signaalin alaraja on 4 mA, koska silloin signaalia voidaan käyttää myös anturin tarvitseman tehon syöttämiseen.

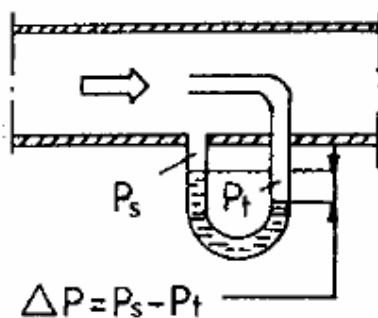
Laitoksella käytetään kolmea erilaista signaalin siirtotapaa. Laitoksen energia-asemalla sijaitsevalla viidennellä kaasumootorilla väylänä toimii profibus DP, muualla laitoksella käytetään profibus PA -väylää ja 4 - 20 mA-hart tasavirta signaalia.

3.2.2 Paine-eroon perustuvat virtausmittarit

Paine-eroon perustuvien virtausmittareiden mittauseriminä toimivat erilaiset putket, kuten pitot-, Brandtlin-, Annubar-, dall- ja venturiputki, ja kuristuslaipat. Yleisimpiä näistä ovat kuristuslaipat sekä pitot- ja venturiputket.

Mittalaippa on kuristuselimistä yksinkertaisin ja sen käyttö on todella yleistä. Se voidaan asentaa suoraan putkilaippojen väliin ja porata mittayhteet esimerkiksi putkilaippoihin. Usein laippojen väliin asennetaan kuitenkin rengaskammiot, joiden väliin mittalaippa asennetaan. [7, s. 74.] Rengaskammion ansiosta mittalaipan tulo- ja jättöpuolen paineet mitataan keskiarvona joka puolelta putkea [9, s.106]. Tällä tavalla saadaan luotettavampi mittaustulos kuin vain yhdestä paikasta mitattaessa. Mittauslaipan etuina on sen helppo asennus ja yksinkertaisuus. Sen heikkouksiin on luettava laipan aiheuttamat pyörteet, jotka johtavat tehohäviöihin, ja laipan etureunan pyöristyminen, mikä aiheuttaa huomattavaa mittaustarkkuuden laskua.

Pitot-putken toiminta perustuu siihen, että mitataan virtausnopeuden aiheuttama dynaamisen paineen ja prosessiputkistossa vallitsevan staattisen paineen välinen ero [7, s. 79]. Mittaputket asennetaan niin, että toinen putki on kohtisuoraan virtausta vastaan ja toinen haara on pystysuorassa putkeen ja virtaukseen nähden, jolloin se mittaa putkessa vallitsevan staattisen paineen. Virtausta kohtisuoraan vastaan oleva haara mittaa putken staattisen paineen lisäksi myös dynaamisen paineen. Kuvassa 5 on esitetty pitot-putken toiminta.

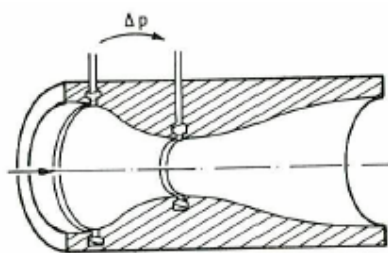


Kuva 5. Pitot-putki [7, s. 76]

Staattisen paineen (P_s), kokonaispaineen (P_t) ja virtaavan aineen tiheyden avulla virtauksen nopeus voidaan johtaa Bernoullin yhtälöstä. Pitot-putki mit-

taa virtausnopeuden putken yhdestä kohdasta, joten se ei kerro putkessa tapahtuvaa keskimääräistä virtausnopeutta, jolloin oikean virtausnopeuden selvittämiseksi käytetään kullekin putkikoolle ja tyyille kokeellisesti määrättyjä kertoimia. [7, s. 77.]

Venturiputki on myös eräänlainen kuristuselin. Venturiputki on muotoiltu virtausta myötäilevästi, joten sen virtausvastus ja painehäviö on huomattavasti pienempi kuin mittalaipan. Putki kapenee tasaisesti keskikohtaa kohti ja lyhyen lieriömäisen keskialueen jälkeen poistupuolen putki levenee ja vastaa prosessiputken halkaisijaa [7, s. 80].



Kuva 6. Venturiputki [9, s.108]

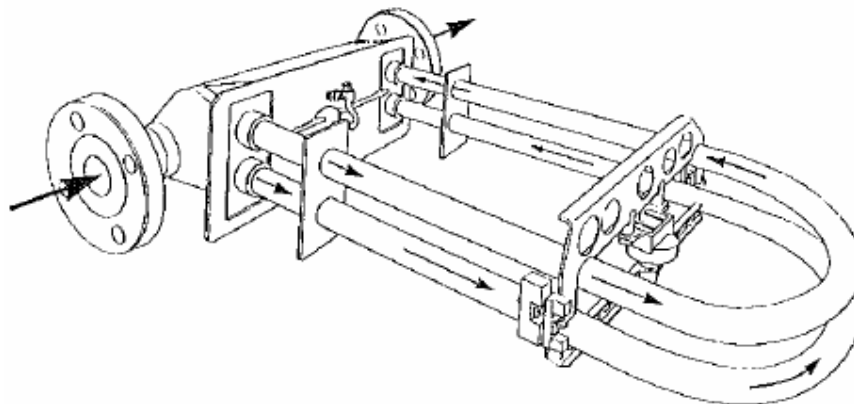
Venturiputkessa mitataan paine ennen putken kavennusta ja kavennuksen kohdalla. Kavennuksen kohdalla virtausnopeus kasvaa, jolloin paine pienenee, eli ennen kavennusta mitattu paine on suurempi kuin kavennuksen kohdalla. Tämän paine-eron avulla saadaan selvitettyä virtausnopeus.

3.2.3 Pyörrevanavirtausmittaus

Pyörrevanavirtausmittaus eli vortex-mittaus perustuu sopivasti muotoillun symmetrisen virtausesteen synnyttämiin pyörteisiin, jotka irtoavat vuorotellen esteen vastakkaisilta puolilta. Irtoavat pyörteet saavat aikaan paine-eroja, jotka vääntävät anturia, mikä on sijoitettu aivan virtausesteen taakse. Vääntövoima aiheuttaa aineessa jännityksen, joka ilmaistaan mm. pietsosähköisellä elementillä, differentiaalikondensaattorilla, termoanturilla tai venymäliuskalla ja muunnetaan sähköiseksi jännitteeksi [7, s. 89]. Tämän sähköisen jännitteen taajuus on verrannollinen virtauksen nopeuteen. Vortex-mittausta voidaan käyttää niin nesteille kuin kaasuillekin. Se ei ole riippuvainen aineen tiheydestä, paineesta tai lämpötilasta, joten periaatteessa samaa mittaria voidaan käyttää ilman kalibrointia sekä nesteille että kaasuille.

3.2.4 Coriolis-ilmiöön perustuva virtausmittaus

Coriolis-ilmiöön perustuvassa virtausmittarissa mitattava aine ohjataan värähtelemään saatetun U-muotoisen mittaputken läpi. Virtaava aine muuttaa putkihaarojen värähtelyn amplitudia, jolloin virtausnopeus pystytään määrittämään putkihaarojen värähtelyamplitudien perusteella. Käytössä on sekä yksi- että kaksiputkisia rakenteita. [7, s. 102.] Kuvassa 7 on esitetty kaksiputkinen virtausmittari.



Kuva 7. Kaksiputkinen virtausmittari [7, s. 102]

Putkien liikkeitä mitataan antureilla u-putken tulo- ja lähtöpuolelta. Ne antavat sähköisen viestin, mikä on verrannollinen putken taipumiseen. Mitattaessa putkien taipumista vältetään lämpötilan, paineen, tiheyden, viskositeetin ja johtokyvyn vaikutuksen aiheuttamilta virheiltä.

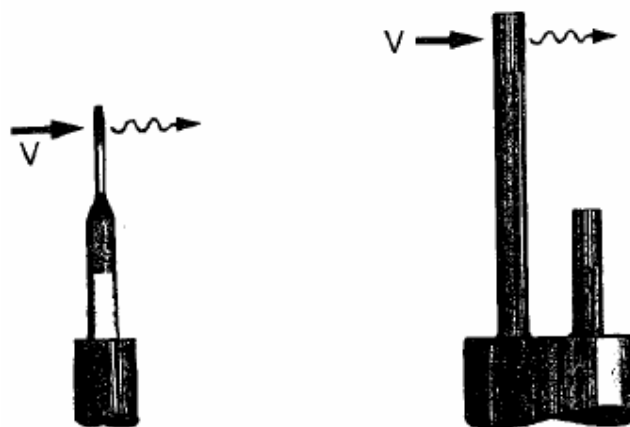
3.2.5 Termiset mittausmenetelmät

Termiset massavirtausmittarit pystyvät mittaamaan hyvin laajaa virtausta aina muutamasta g/h hyvin suuriinkin virtausmääriin saakka. Mittausperiaatteita on kaksi. Virtauksen mittaus tapahtuu joko mittaputkella tai mittasauvalla.

Pienemmillä virtausalueilla mitattavan prosessin koko virtausmäärä ohjataan mittaputken läpi ja suuria virtausmääriä mitattaessa vain osa virtauksesta ohjataan mittaputken kautta, mutta kummassakin tapauksessa itse mittaus suoritetaan samalla periaatteella eli lämpötilaeron mittauksella. Mittaputken keskikohdalla on vastus ja sen molemmille puolille on järjestetty lämpötilan mittaukset. Tulopuolelta mitataan tulevan prosessin lämpötila ja kuumenuskohdan välinen lämpötilaero. Lähtöpuolelta mitataan lämmitetyn

prosessin ja kuumennuskohdan välinen lämpötilaero. Virtausnopeuden kasvaessa lämpötilaero pienenee, minkä perusteella saadaan ilmaistua massavirta.

Sauvamaaisessa mittausanturissa on kaksi elementtiä. Toinen elementti on kuumennuselementti, joka mittaa myös lämpötilan, ja toinen elementti mittaa ainoastaan väliaineen lämpötilan. Kuumennuselementti ja mittausanturi voivat olla joko samassa sauvassa tai erikseen. [7, s. 94.]



Kuva 8. Sauvamainen mittausanturi [7, s. 94]

Anturiin kohdistuva virtaus muuttaa anturin lämpötilaa. Anturin pinnalla esiintyy rajakerros, jonka ulompi pinta on virtaavan aineen lämpötilassa. Rajakerroksen läpi siirtyy lämpöä suhteessa virtaavan aineen ja sylinterin lämpötilan väliseen eroon. Virtausnopeuden lisääntyessä tai virtaavan aineen tiheyden kasvaessa rajakerros ohenee ja siirtää helpommin lämpöä Lämmönsiirtymiskerroin kasvaa väliaineen virtausnopeuteen ja tiheyteen verrannollisesti. Tämän ominaisuuden ansiosta anturi soveltuu massavirran mittaamiseen. [7, s. 94.]

3.3 Virtausmittareiden valinta

Mittausmenetelmien lukumäärä ja soveltuvuus tuovat omat haasteensa virtausmittareiden valintaan. Mittalaitetta valittaessa tulee ottaa huomioon tarvittava mittatarkkuus sekä mittausmenetelmän soveltuvuus vallitseviin olosuhteisiin ja mitattavaan aineeseen. Joissakin tapauksissa mittalaitteen asennustapa ja hinta voivat olla myös valintaan vaikuttavia tekijöitä. Laitoksen paineilma-verkon virtausmittausta suunniteltaessa merkittävimmiksi mit-

tareiden valintaperusteiksi osoittuivat valmistaja, asennusmalli ja vallitsevat olosuhteet.

3.3.1 *Laittevalmistaja*

Laitoksen instrumentointiin on vaikuttanut merkittävästi käytössä oleva automaatiojärjestelmä, jonka on toimittanut Metso Automation. Aikaisempia instrumenttihankintoja tehtäessä on huomattu, että muiden valmistajien kuin Metson tuotteiden asentaminen ja liittäminen automaatiojärjestelmään on välillä osoittautunut ongelmalliseksi. Tästä johtuen virtausmittareita valittaessa päätettiin keskittyä vain Metson tarjoamiin tuotteisiin, jolloin varmistettaisiin mittareiden toimivuus ja parempi tuotetuki. Laitteiden toimittajaksi valittiin Metso Automationin omistama Metso Endress+Hauser, minkä laajasta tuotevalikoimasta löytyivät kaikki yleisimmät kaasuille tarkoitetut mittaussuhteet.

3.3.2 *Olosuhteet*

Toinen mittareiden valintaan vaikuttava tekijä oli vallitsevat olosuhteet. Osa mittaussuhteista tarvitsee toimiakseen varsin tarkat lähtötiedot, mitkä vaikuttavat merkittävästi laitteen oikeaan mitoittamiseen, toimintaan ja mittatarkkuuteen. Yksi vartenotettava mittaussuhteiden paineilman virtauksen mittaamiseen oli paine-eroon perustuva pitot-putkimittaus. Mittaussuhteiden on hyvin tarkka, mutta toimiakseen oikein pitäisi lähtötietojen olla myös tarkat. Pitot-putkimittauksista mitoittaessa tulisi tietää putken koon lisäksi seinämän paksuus, paineilman lämpötila, putkistossa vallitseva paine ja virtaus alue. Luotettavaa ja tarkkaa tietoa ei ollut saatavilla kuin putkiston koosta ja paineesta. Putken seinämän paksuudesta, virtaus alueesta ja paineilman lämpötilasta mittalaitteiden sijoitus kohteissa ei ollut saatavilla tarkkaa tietoa. Olosuhteiden puutteellisen tietämyksen takia pitot-putkimittauksen valinta ei ollut mahdollinen.

3.3.3 *Mittareiden asennusmalli*

Kolmas valintaan vaikuttava asia oli virtausmittareiden asennusmalli. Mittareiden asennuksessa käytetään kolmea erilaista asennustapaa. Nämä ovat laipallinen, insert ja putken päällinen asennus. Putken päällistä asennusta käytetään vain ultraäänivirtausmittareissa, mutta mittaussuhteiden ei kuitenkaan sovellu kaasujen mittaukseen. Näin valinta jouduttiin suorittamaan laipallisten ja insert -mallisten virtausmittareiden välillä. Valintaa tehtäessä

suurin painoarvo asetettiin mittarin asennuksen ja siirtämisen helppouteen, eikä niinkään mittaustarkkuuteen. Mittareiden pääasiallinen hankintatarve oli ilman kulutuksen seuranta, eikä prosessin ohjaus, joten mittatarkkuudesta oltiin valmiita tinkimään.

Laipallisia virtausmittareita on saatavilla kaikille mittaumenetelmille ja melkein kaiken kokoisille putkille. Laipallisilla mittareilla päästään tarkkoihin mittatarkkuuksiin, mutta niiden asentaminen on työlästä. Mittarin mahdollinen siirto toiseen paikkaan on myös hankalaa, koska laipallinen mittari on sidoksissa putken kokoon.

Insert -mallista virtausmittaria asennettaessa putken kylkeen porataan reikä, mihin mittari liitetään asennusmuhvin ja venttiilin avustuksella. Asennuksen suurimpia vahvuuksia on sen siirrettävyys ja asentamisen vaivattomuus. Toisin kuin laipallinen virtausmittari, insert -mallinen mittari ei myöskään ole sidoksissa putken kokoon yhtä orjallisesti. Sama mittari voidaan yhtä hyvin asentaa niin DN 65 -putkeen kuin DN 100 -putkeen. Insert -mallisen mittarin huonoihin puoliin voidaan lukea mittatarkkuus. Varsinkin putkikoon pienentyessä mittarin asennus vaikeutuu, jolloin asennuksessa tapahtuvat virheet kasvavat ja johtavat mittausepä tarkkuuteen.

Mittarin valinnassa päädyttiin insert -malliseen virtausmittariin. Tämä merkitsi laipallisista mittaumenetelmistä luopumista. Mikä käytännössä merkitsi sitä, että vortex-, corilis- ja kuristuslaippavirtausmittaus oli pois luettuja vaihtoehtoja.

3.3.4 *Terminen massavirtausmittari Proline t-mass 65l*

Parhaiten valintaperusteet täyttävä mittaumenetelmä oli terminen massavirtausmittaus. Termisistä massavirtausmittareista oli laitoksella kokemuksia jo entuudestaan muissa sovelluksissa, ja ne oli todettu hyvin varmatoimisiksi ja huoltovapaiksi.

Metso Endress+Hauserin tuotteista löytyi insert -mallinen terminen massamäärävirtausmittari Proline t-mass 65l, minkä tekniset ominaisuudet olivat hyvin kattavat. Mittarin pystyi liittämään putkikokojen välille DN 80–1500 ja sen mittaalue oli hyvin laaja.

Merkittävä Proline t-mass 65l -mallin valintaan vaikuttavista tekijöistä oli sen sähköisten liitännöiden monipuolisuus. Mittarit pystyttiin asentamaan niin Profibus DP kuin 4-20mA-Hart väyläänkin. Tarkemmat virtausmittarin tekniset tiedot löytyvät liitteestä 4.

3.4 Mittareiden asennus

3.4.1 Mittauspisteiden valinta

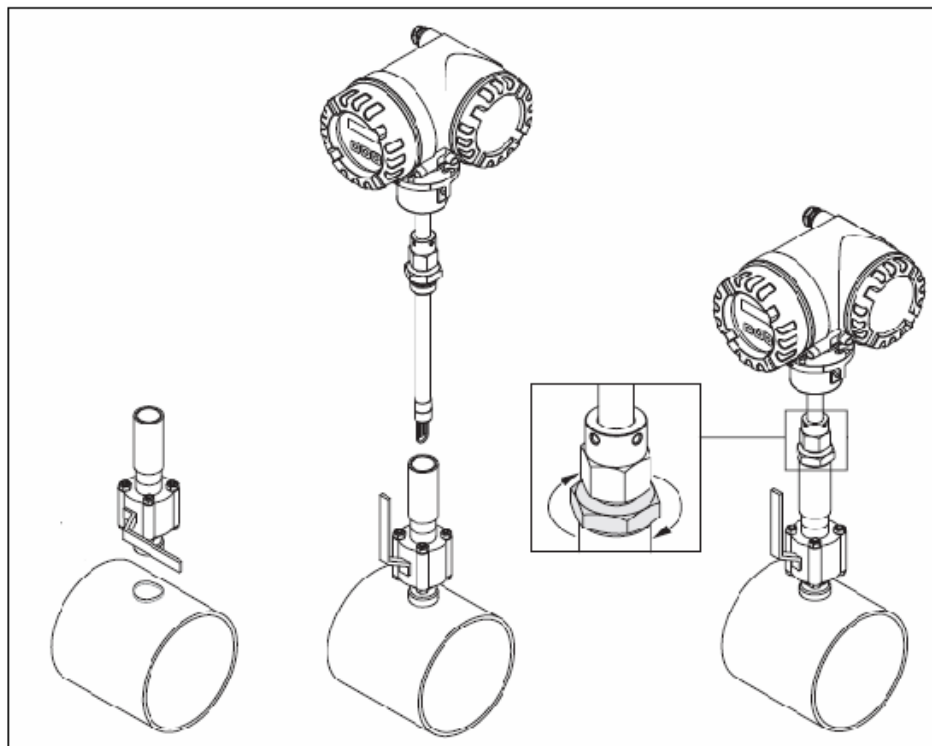
Mittareiden suhteellisen korkeasta hankintahinnasta sekä verkoston monimutkaisuudesta ja laajuudesta johtuen virtausmittareita päätettiin aluksi hankkia vain kaksi kappaletta. Mittareista ensimmäinen sijoitettiin energia-asemalla sijaitsevaan paineilmakeskukseen, jolloin saataisiin selville paineilman kokonaistuotanto. Toinen mittareista taas sijoitettiin luolastossa, käytävällä E7, sijaitsevaan runkoputkeen. Runkoputkeen liitetyn mittarin paikka valittiin niin, että laitos voitiin jakaa paineilman kulutuksen kannalta kahteen osaan. Mittauksen etupuolelle jäi energia-asema, lietteenkäsittely, mädättämöt ja esikäsittely. Mittarin toiselle puolelle taas jäi vesiasema ja suodatinlaitos.

3.4.2 Mekaaniset työt

Mekaaniset työt tehtiin laitoksen konekunnossapidon suorittavan henkilöstön avustuksella. Työt aloitettiin runkoputkeen tulevan mittarin asennuksen suunnittelulla, tarvikkeiden hankinnalla ja paineilman jakelun varmistamisella asennuksen aikana. Paineilman tuotanto katkaistiin aluksi hetkellisesti lietteenkäsittelystä ja mädättämöiltä, jotta runkoputkeen saatiin asennettua uusi sulkuventtiili. Runkoputkeen asennetun venttiilin ja aikaisempien sulkuventtiilien avustuksella saatiin runkoputkesta paineettomaksi noin 20 metriä pitkä osuus, johon virtausmittari voitiin asentaa ilman, että laitoksen paineilman jakelu häiriintyisi enempää. Asentamalla mittari sulkujen väliin varmistuttiin samalla myös siitä, että mahdolliset mittarin huoltotoimet eivät vaikuttaisi paineilman jakeluun.

Mittari asennettiin runkoputkeen palloventtiilin lävitse, jolloin mittayhde olisi huoltotoimien tai mittarin mahdollisen siirron yhteydessä helppo sulkea. Putken kylkeen hitsattiin aluksi asennusmuhvi, mihin venttiili pystytettiin asentamaan kierteiden avustuksella.

Tämän jälkeen mittari upotettiin putkeen venttiiliin lävitse ja kiinnitettiin kier-teillä venttiiliin. Kuvassa 9 on esitetty periaatekuva virtausmittarin asennuk-sesta.



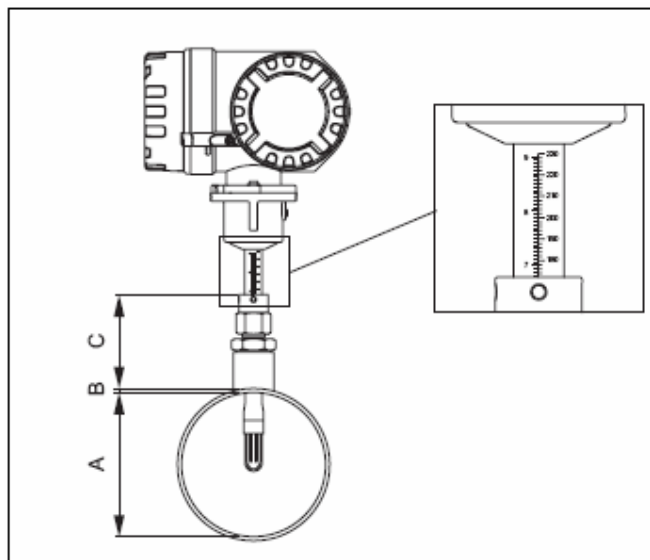
Kuva 9. Proline t-mass 65l massavirtausmittarin asentaminen [12, s. 22]

Seuraavaksi laskettiin ja asetettiin mittarin upotussyvyys, niin että mittauselin saatiin putken keskelle. Laskenta suoritettiin virtausmittarin manuaalista löy-tyvän laskentakaavan ja putken dimensioiden avulla. Upotussyvyyden kaava on

$$(0,3 \times A) + B + C + 2mm \quad (1)$$

jossa A on putken sisähalkaisija, B on putkenseinämän paksuus ja C on venttiilin pituus. Laskennan jälkeen syvyys asetettiin oikeaksi mittarissa ole-van asteikon avustuksella ja lukittiin. Edellä kuvatut virtausmittarin asennus-vaiheet suoritettiin myös toiselle mittarille, joka kiinnitettiin paineilmakeskuk-sen ulkopuolelle olevan syöttöputkeen. Toista mittaria asennettaessa ei sul-kuventtiilien asennuksia tarvittu, vaan koko energia-asema voitiin tehdä pai-neettomaksi.

Liitteessä 4 on esitetty laskelmat mittareiden upotussyvyyksistä. Kuvassa 10 taas on esitetty mittarin upotussyvyyden laskentaan tarvittavat mitat ja mittarissa oleva asteikko.



Kuva 10. Upotussyvyyden mitoitus pyöreissä putkissa [12, s.19]

3.4.3 Kytkeä

Mekaanisten töiden jälkeen suoritettiin tarvittavat kaapeleiden vedot ja sähköiset kytkennät. Luolastossa sijaitseva mittari kytkettiin 4-20mA-hart väylään ja paineilmakeskukseen tuleva mittari liitettiin kaasumootorilla 5 käytettävään profibus DP -väylään. Luolastossa kaapelit vedettiin lietteenkäsittelyssä sijaitsevasta I/O-kaapista ja paineilmakeskukseen tulevan mittarin kaapelit haaroitettiin kaasumootorin 5 tulevan kaasun virtausmittauksen vahvistimesta. Kummassakin tapauksessa kaapeleita vedettiin kaksi kappaletta, joista toinen oli signaalin siirtämistä ja toinen tehonsyöttöä varten. Liitteessä 5 on esitetty mittareiden sähkökuvat.

Kaapeloinnin jälkeen mittareiden tehdasasetukset, jotka oli asetettu tilauksen yhteydessä annettujen tietojen perusteella, tarkistettiin ja tarvittaessa muutettiin. Mittarin omalta näytöltä voitiin muuttaa putken kokoa, sisähalkaisijaa, virtaavaa ainetta, mitta-aluetta, mitattavaa suuretta ja signaali aluetta, joten väylän tai erillisen laitteen välityksellä ei tarvinnut tehdä mitään asetusmuutoksia. Ainoat asetusmuutokset jouduttiin tekemään mitta-alueeseen ja ulos saatavaan suureeseen. Mitattavaksi suureeksi päätettiin ottaa normaalikuutiota/tunnissa Nm^3/h . Kaikkien kolmen kompressorin käydessä

maksimi tehoillaan tuottivat ne yhteensä 600 Nm³/h. Tämän maksimi tuoton saavuttaminen on käytännössä mahdotonta, mutta kompressorit on sijoitettu eri puolille laitosta, päätettiin mitta-alueeksi silti ottaa 0 - 600 Nm³/h. Kuvasa 11 on esitetty paineilmakeskukseen sijoitettu virtausmittari.



Kuva 11. Paineilmakeskukseen syöttöputkeen asennettu virtausmittari

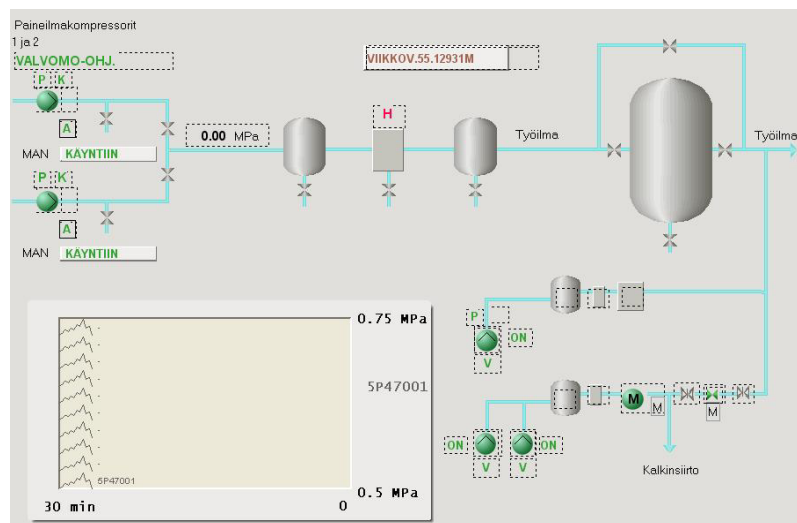
3.4.4 Ohjelmointi

Laitoksella on käytössä Metso Automationin tekemä AutoCad-pohjainen FbCAD – Functio block diagram CAD, millä suurin osa laitoksen ohjelmoinnista suunnitellaan. Ohjelmassa on laajat Metson tekemät valmiit kirjastot, mistä löytyy valmiita toimintalohkoja, joita on helppo käyttää hyväkseen ohjelmoinnissa. Uudet ohjelmat ja jo olemassa olevien ohjelmien muutokset pystytään siirtämään suoraan automaatiojärjestelmään helpolla online komennolla ilman että prosessi välillä katkeaisi.

Valmiiden toimintalohkojen ansiosta ohjelmointi oli suhteellisen nopeaa ja sujui ilman ongelmia. Toimintalohkoihin asetettiin oikeat osoitteet ja nimet, ja määritettiin mitattavan suureen yksikkö ja skaala. Tämän jälkeen liitettiin mitaukset haluttuun prosessinohjausjärjestelmän kuvaan, tarkistettiin mahdolliset virheet ja siirrettiin ohjelma järjestelmään. Liitteessä 6 on esitetty virtausmittareille tehdyt ohjelmat.

3.4.5 Prosessikuvan päivitys

Metso Automationin DNAuse-prosessinohjausjärjestelmässä olevan prosessikuvan päivittäminen tehtiin DNAuseEditor Process Picture editor -sovelluksella. Ohjelman kirjastoissa on valmiita prosessikomponentteja, joilla pystytään luomaan haluttu prosessikuva. Tässä tilanteessa kuvaa ei kuitenkaan lähdetty tekemään tyhjästä, vaan vanhaa kuvaa päätettiin vain hieman muokata. Kuvassa 12 on esitetty työilman tuoton vanha prosessikuva.



Kuva 12. Prosessinohjausjärjestelmästä kaapattu alkuperäinen prosessikuva

Prosessikuvaa muokattiin niin, että siitä pystyisi hahmottamaan paremmin laitoksen todellisen paineilma-verkon rakenteen ja kompressoreiden sijainnit. Kuvaan piti myös lisätä verkostoon asennetut virtausmittarit. Uusi prosessikuva on esitetty liitteessä 7.

4 TYÖPAINEILMATUOTANNON ENERGIANKULUTUKSEN TUTKIMINEN

Paineilman tuottaminen vaatii huomattavia määriä energiaa ja sen laskennallinen kokonaishyötysuhde on huono. Huolimattomasti suunnitelluissa tai kehnosti huolletuissa paineilmajärjestelmissä paineilman hyötysuhde voi olla pahimmissa tapauksissa vain muutamia prosentteja. Paineilman tuottamiseen liittyvää energialaskua voidaan pitää aisoissa oikeilla laitevalinnoilla, laitteiden oikealla käytöllä ja ennen kaikkea yleisellä tietämyksellä siitä, mistä paineilmajärjestelmän energiankulutus ja kustannukset koostuvat.

4.1 Paineilman energiankulutus

Tarkasteltaessa paineilmajärjestelmää kokonaisuutena, voidaan järjestelmästä havaita useita energiansiirtokohteita. Energia siirtyy järjestelmässä mekaanisena tehona, lämpövirtana tai ilman mukana sen ominaisentalpiisten muutosten kautta. [10, s. 105.] Paineilmantuotantoon käytetystä energiasta mekaaninen teho voidaan hyödyntää toimilaitteissa, mutta muilta osin järjestelmään tuotu energia poistuu lämpönä.

4.1.1 Paineilman exenergia

Paineilmalla on kyky tehdä työtä. Tätä työkykyä nimitetään exenergiaksi. Exenergialla tarkoitetaan sitä mekaanisen energian määrää, joka paineilmalla enintään voidaan tuottaa ilman paisuessa takaisin alkutilaansa eli imuilman paineeseen ja lämpötilaan. [10, s. 15.] Paineilman exenergian suuruuteen vaikuttavat paine ja lämpötila, joten paineen ja lämpötilan kasvaessa myös exenergia kasvaa. Mikäli alkutilanne tunnetaan, voidaan exenergian suuruus helposti laskea. Jatkuvan virtauksen tilanteessa ominaisexenergia (e_x) on ideaalikaasuille

$$e_x = RT_A \ln \left(\frac{P_A}{P_L} \right) \quad (4)$$

missä R on ominaiskaasuvakio, T_A on puristuksen alkulämpötila, P_A on puristuksen alkupaine ja P_L on loppupaine [10, s. 15]. Exenergialla ei ole yleistä häviämättömyyden lakia, vaan exenergian häviöt syntyvät erilaisista laitehäviöistä.

Puristuksessa ilmaan tehdään työtä, jolloin ilman exenergia ja usein myös sisäinen energia lisääntyy [10, s. 15]. Paineilman kokonaisenergia muodostuu puristuksessa syntyvän lämmön ja ilmaan tehdyn työn summasta. Tehdyn työn ja lämmön suhteeseen vaikuttavat kolme erilaista puristusmallia. Isentrooppisessa puristuksessa ilman sisäinen energia kasvaa suoraan tuodun työn määrällä, sillä puristuksessa ei siirry lämpöenergiaa. Isentrooppista puristusmallia sovelletaan silloin, kun prosessi on niin nopea että lämmönsiirtoa ei tapahdu lainkaan. Se on hyvä malli radiaali- ja aksiaalityyppisille kompressoreille sekä öljyttömille ruuvikompressoreille. Isotermisessä puristuksessa tehty työ siirtyy lämpönä ympäristöön ja tapahtuman lämpötila pysyy vakiona. Todelliset kompressorit eivät pysty edes likimain toteuttamaan

isotermistä puristusta. Polytrooppisessa puristusmallissa osa puristuksessa tehdystä työstä poistuu lämpönä ympäristöön ja osa kasvattaa sisäistä energiaa. Todellisia puristusprosesseja kuvataan usein polytrooppisen mallin avulla. [10, s. 16–17.]

4.1.2 Kompressorin hyötysuhde ja energiankulutus

Kompressorin hyötysuhde määritellään isentrooppisen tai isotermisen ihaneprosessin avulla. Isentrooppisen prosessin käyttö on huomattavasti yleisempää kuin isotermisen prosessin käyttö, koska tämän puristusmalli on lähempänä todellista kompressoria. Kummassakin tapauksessa hyötysuhde määritellään kompressorin akselitehon suhteen. Kompressorin isentrooppinen hyötysuhde määritellään seuraavasti [10, s. 21]:

$$\eta_{is} = \frac{P_{is}}{P_{aks}} \quad (5)$$

jossa p_{is} on isentrooppisen ideaalipuristusprosessin vaatima tehontarve puristettaessa vakio tilavuusvirta määräpaineeseen ja p_{aks} on moottorin akselitehotarve.

Kompressoreiden energiankulutusta ja tehoa kuvataan käytännössä sähkötehon ominaiskulutuksella. Sähkötehon ominaiskulutus (p_{om}) lasketaan kompressorin sähkötehon ja tuotetun ilmamäärän suhteesta. Kun tiedetään kompressorin isentrooppinen (η_{is}), mekaaninen (η_{mek}), sähköinen hyötysuhde ($\eta_{säh}$) ja kompressorin tuottama ilmamäärä (q_{vN}), voidaan sähkötehon ominaiskulutus määrittää seuraavasti [14, s. 41]:

$$p_{om} = \frac{P_{is}}{\eta_{is} \cdot \eta_{mek} \cdot \eta_{säh} \cdot q_{vN}} \quad (6)$$

4.1.3 Jälkikäsitteilylaitteiden energiankulutus

Jälkikäsitteilylaitteiden energiankulutus voidaan jakaa kahteen osaan. Välittömät energiakustannukset muodostuvat jäähdyttimen pumpun tai puhaltimen, jäähdytyskuivaimen kompressorin sekä absorptiokuivaimen sähkövastusten tai kuumennuspuhaltimen energiatarpeista [10, s. 107]. Välillinen energiankulutus taas muodostuu painehäviöistä ja erilaisista tyhjennyksistä, joihin joudutaan käyttämään paineilmaa. Esimerkiksi jäähdytyskuivaimen

veden tyhjentämisen yhteydessä kuluu paineilmaa, joka vaikuttaa ilmankulutukseen ja sitä kautta kompressorin energiankulutukseen.

4.1.4 Paineilmajärjestelmän häviöt

Kompressoreissa käytetään voimanlähteenä yleensä kolmivaihe - epätahtimoottoreita. Niiden aiheuttamat häviöt koostuvat sähköisistä ja mekaanisista häviöistä. Mekaanisia häviöitä aiheuttavat esimerkiksi laakerointi ja moottorin tuuletus. Itse kompressorin häviöt taas riippuvat sen puristustyyppistä. Ruuvikompressoreissa syntyvät häviöt voidaan jakaa puristustyössä ilmeneviin häviöihin ja mekaanisiin häviöihin. Kompressorin mekaaniset häviöt syntyvät liikkuvien osien kitkasta. [10, s. 21.] Puristuksessa häviöitä aiheuttavat ruuviyksikön sisäiset vuodot. Vuotoreittejä ovat roottoreiden harjojen ja pesän seinämän väliset raot, roottoreiden päätypinnat, roottoreiden välinen tiivistyslinja sekä suora yhteys kahden peräkkäisen puristustilan välillä. Kompressorin hyötysuhde riippuu käyntinopeudesta ja on parhaimmillaan käyntinopeusalueen keskivaiheilla. Pienillä käyntinopeuksilla lisääntyvät vuodot ja suurilla nopeuksilla häviötä aiheuttavat ilman ja öljyn pyörteily. [10, s. 32.]

Jälkikäsitteilyn häviöt syntyvät suodattimista, kuivaimista ja jälkijäähdyttimisistä. Laitteiden häviöt syntyvät niiden aiheuttamasta paine-erosta, mikä joudutaan kompensoimaan tuotetun verkostopaineen tason nostolla. Paineen nostolla on suora vaikutus kompressorin energiankulutukseen, mikä johtaa energiakustannusten kasvamiseen. Paineen nosto kasvattaa myös verkoston sekä toimilaitteiden vuotoja. Toisaalta oikeaan asteeseen käsitelty paineilma aiheuttaa säästöjä toimilaitteiden luotettavamman toiminnan ja pidemmän eliniän kautta. [10, s. 46.]

Suodattimet aiheuttavat keskimäärin 0.3 barin painehäviön, jälkijäähdyttimisistä aiheutuu noin 0.2 barin ja kuivaimista noin 0.1 barin painehäviöt [10, s. 46]. Esimerkiksi laitoksella käytettävät suodattimet ja jäähdytyskuivaimet aiheuttavat teoriassa noin 0.8 barin kokonaispainehäviön, mikä saattaa teoriassa aiheuttaa 11,5–14,5 prosentin korotuksen energiankulutukseen [11, s. 20].

Vuotojen aiheuttamat energiakustannukset ovat merkittäviä paineilmatuotannon kokonaiskustannuksia nostavia tekijöitä. Vuotohäviöitä esiintyy aina, kun verkostossa on painetta, eikä niitä voida välttää. Vuodon määrä on riip-

puvainen verkon paineesta sekä vuotokohdan muodosta. Yleisimpiä vuoto-kohtia ovat putkiliitokset, venttiilit, erilaiset liittimet ja käyttämättömät työkalut. Hyvin huolletussa paineilmajärjestelmässä vuotojen tulisi olla alle 5 prosenttia, kun taas huonosti pidetyissä verkostoissa vuotojen määrä voi olla jopa 20–30 prosenttia koko tuotantokapasiteetista. [11, s. 27.] Vuotomäärä voidaan määrittää vertaamalla kompressorin tuotto- ja kevennysaikoja. Määrittäessä tehtäessä verkostoa ei saa kuormittaa. Vuotoprosentti määritetään yhtälöstä:

$$L(\%) = \frac{T \cdot 100}{T + t} \quad (7)$$

missä T on käyntiaika tuotolla ja t käyntiaika kevennyksellä [11, s. 27]. Vuotokohtien paikantaminen voi olla ongelmallista laajassa järjestelmässä. Vuotokohtien etsintä onnistuu hiljaisessa laitoksessa parhaiten kuulohavaintojen perusteella, mutta jos tämä ei ole mahdollista niin vuotokohtia voidaan etsiä myös ultraäänivuotomittarin tai ruiskutettavien ja vaahtoavien aineiden avulla. Vuotojen vaikutuksilta voidaan välttyä parhaiten kuitenkin henkilöstön oikealla asennoitumisella. Pienistäkin vuodoista tulisi heti ilmoittaa, koska verkosta ei vuoda vain ilmaa, vaan myös energiaa.

4.2 Työpaineilman tuottamisen energiankulutuksen selvittäminen

Kuten luvussa 2.2 kerrottiin, laitoksen työpaineilma tuotetaan paineilmakeskuksessa sijaitsevilla kompressoreilla 1 ja 2, sekä lietteenkäsittelyn kompressorilla 3. Verkkoon on liitetty myös paineilmakeskuksessa oleva varakompressor ja esikäsitellyssä sijaitsevat kalkinsiirron kompressorit, mutta nämä kolme kompressoria päätettiin kuitenkin jättää pois energiankulutuksen selvitystyöstä, niiden vähäisestä käytöstä johtuen.

4.2.1 Mittausten suorittaminen

Kompressoreiden sähkötehon kulutuksen selvittämiseen käytettiin avuksi laitoksen automaatiojärjestelmää, jolloin kompressoreihin ei tarvinnut järjestää erillisiä pitkäkestoisia tehomittauksia. Kompressoreiden käyntiä tuotolle ja kevennykselle ohjataan verkoston paineen avulla, mikä tarkoitti sitä että kompressoreiden sähkötehon kulutus pystyttiin määrittämään kompressorin ohjaukseen tehdyillä muutoksilla.

Kompressoreiden virta mitattiin virtapihdeillä koneen käydessä tuotolla ja kevennyksellä. Mitattujen virtojen ja tyyppikilvestä löytyvien tietojen avulla pystyttiin laskemaan kompressorin käyttämä teho niin tuotolla kuin kevennyksellä seuraavan kaavan mukaisesti:

$$P = U_n \times I_n \times \sqrt{3} \times \cos \varphi \quad (8)$$

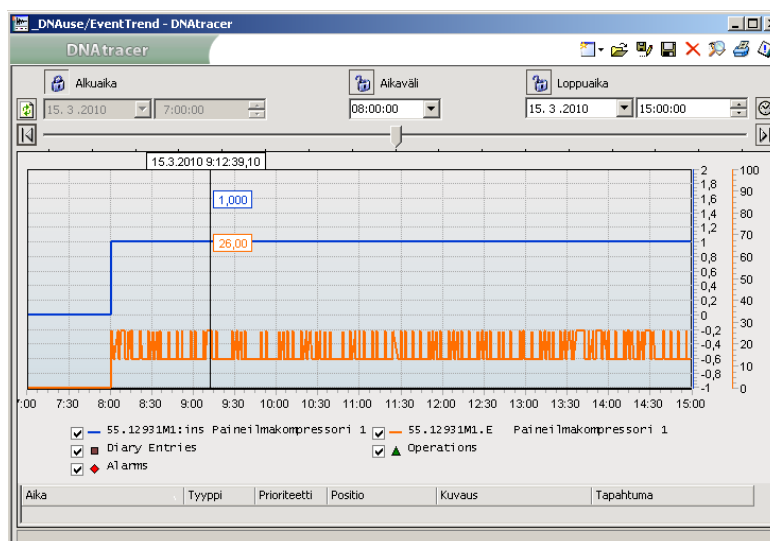
missä U_n on jännite (V) ja I_n virta (A). Kompressorin saatiin tuotolle kytkemällä kone käyntijärjestyksen valintakeskuksesta tuottavaksi koneeksi ja kevennykselle vaihtamalla kone käyntijärjestyksessä seuraavaksi. Kompressoreiden 1 ja 2 virrat olivat koneiden käydessä tuotolla 26 A ja kevennyksellä 13 A. Kompressorin 3 virta tuotolla oli 23 A ja kevennyksellä 11 A. Kompressoreiden siirtyessä kevennykselle, niiden ottoteho pienenee hitaasti, joten kevennyksen virrat kirjattiin, kun mittarin näyttämä oli tasaantunut. Tähän kului aikaa noin 20 - 30 sekuntia siitä, kun kone siirtyi kevennykselle.

Mitattujen virtojen ja yllä esitetyn kaavan avulla kompressoreiden 1 ja 2 tehot laskettiin olevan tuotolla 26 kW ja kevennyksellä 13 kW. Kompressorilla 3 vastaavat tehot olivat tuotolla 24 kW ja kevennyksellä 11 kW.

Mittausten jälkeen tehtiin tarvittavat lisäykset kompressoreiden ohjaukseen ja liitettiin ne tiedonkeruujärjestelmään. Kompressoreiden ohjaus on toteutettu painekaistaohjauksella, joka tarkoittaa että koneiden käyntiä ohjataan suoraan verkoston paineella. Käydessään kompressorit toimivat automaattilla ja ohjaus tapahtuu paineen ylä- ja alarajojen tiedoilla. Kompressoreista kerätään myös käyntiajat, niiden omasta käyntiaikamittarista, käyntiaikaraportteja ja kunnossapidon toiminnanohjausjärjestelmää varten. Kompressorin käydessä automaatiojärjestelmästä saadaan siis kaksi erillistä tietoa koneen käynnistä, eli automaattiohjauksen ja kompressorin käyntitieto. Näiden kahden tiedon avulla pystyttiin määrittämään, toimiiko kompressorin tuotolla vai kevennyksellä. Kummankin tiedon ollessa voimassa kompressorin tiedettiin käyvän tuotolla. Jos taas automaattiohjaus ei ollut voimassa, mutta kompressorin oli kuitenkin käynnissä, niin voitiin olettaa että kone kävi kevennyksellä. Kummankin tiedon ollessa negaatioita kompressorin oli pysähtynyt. Liitteessä 8 on esitetty muutokset kompressorin 1 ohjaukseen ja tiedonkeräykseen. Samat muutokset tehtiin myös kahdelle muulle kompressorille.

4.2.2 Kokonaiskulutuksen arviointi

Paineilmatuotannon energiankokonaiskulutus voidaan selvittää, kun tiedetään kompressoreiden ja jälkikäsittelylaitteiston käyttämät sähkötehon kulutukset ja koneiden käyntitunnit. Kompressoreiden sähkötehon kulutus pystyttiin yllä kuvattujen ohjelmamuutosten avulla määrittämään suoraan prosessinohjausjärjestelmästä. Järjestelmästä saatiin myös selville kompressoreiden käyntitunnit. Kuvassa 13 on esitetty prosessinohjausjärjestelmästä saatu kuvaaja kompressorin 1 käyntitiedoista ja sähkötehon kulutuksesta.



Kuva 13. Sähkötehon kulutus on merkattu kuvaan oranssilla ja käyntitieto sinisellä.

Ennen kompressoreiden kokonaiskulutuksen arvioimista koneiden keskimääräinen teho oli selvitettävä. Tämä tapahtui mittaamalla kuukauden ajalta jokaisen kompressorin sähkötehon kulutus ja selvittämällä niiden käyntitunnit. Tietojen avulla keskimääräinen teho voitiin laskea jakamalla sähkötehon kulutus käyntitunneilla. Kompressoreille 1 ja 2 keskimääräiseksi tehoksi saatiin 21 kW ja kompressorille 3 kulutus asettui 18 kW (taulukko 1).

Taulukko 1. Kompressoreiden keskimääräinen sähkötehon kulutus

| 1.1 - 31.1.2010 | Kompressorin 1 | Kompressorin 2 | Kompressorin 3 |
|------------------|----------------|----------------|----------------|
| kW | 12010 | 4009 | 1539 |
| Käyntitunnit (h) | 560 | 192 | 86 |
| kW | 21 | 21 | 18 |

Keskimääräisen kulutuksen selvittämisen jälkeen pystyttiin arvioimaan kompressoreiden kokonaiskulutus vuoden ajalta kertomalla keskimääräinen kulutus koko vuoden käyntitunneilla. Taulukossa 2 on esitetty kompressoreiden kokonaiskulutus vuodelle 2009.

Taulukko 2. Kompressoreiden kokonaiskulutus.

| 1.1.2009 - 31.12.2009 | Kompressor 1 | Kompressor 2 | Kompressor 3 |
|-----------------------|--------------|--------------|--------------|
| Käyntitunnit (h) | 4370 | 3434 | 1061 |
| kW/h | 93724 | 71702 | 18984 |

Kokonaiskulutus oli vuonna 2009 kompressorilla 1 93,7 MW/h, kompressorilla 2 71,7 MW/h ja kompressorilla 3 19,0 MW/h.

Laitoksen jälkikäsittelylaitteiston sähkötehon kulutus määritettiin laitteiden kilpiarvojen ja käyntituntien avulla. Laitoksen paineilmatuotanto on katkeamaton, mikä tarkoittaa sitä, että jäähdytyskuivaimet olivat toiminnassa koko ajan. Käyntitunteja kertyi siis 8760 h vuodessa. Paineilmakeskuksen kuivaimen tehon ollessa 3,0 kW ja lietteenkäsittelyn laittilan kuivaimen tehon ollessa 1,1 kW saatiin kuivainten kokonaiskulutukseksi 35,9 MW/h. Työilman tuottamisen energian kokonaiskulutukseksi saatiin 220,3 MW/h vuodessa. Tarkat laskelmat kokonaiskulutuksen määrittämiseksi on esitetty liitteessä 9.

5 JÄRJESTELMÄN KOKONAISTALOUS

5.1 Käyttökustannukset

Paineilmajärjestelmän käyttökustannukset koostuvat energia- ja ylläpitokustannuksista. Energiakustannukset syntyvät pääosin kompressorin käyttämästä energiasta ja jäähdyttimien ja kuivaimien energian kulutuksesta. Ylläpitokustannukset taas käsittävät laitteiston kunnossapitokustannukset ja varaosat. Yleisesti paineilman käyttökustannukset ilmoitetaan euroa per tuotettu ilmamäärä (€/Nm³), mutta laitokselle asennetuista virtausmittauksista ei vielä tässä vaiheessa pystytty saamaan luotettavaa tietoa kokonaistuotosta, joten laitoksen työilman tuottamisen käyttökustannukset päätettiin määrittää €/a.

Suurin osa laitoksen paineilmajärjestelmän laitteista on liitetty kunnossapidon toiminnanohjausjärjestelmään. Kullekin laitteelle on järjestelmään luotu omat ennakkohuollot ja tarkastukset, jotka suoritetaan säännöllisin aika- tai käyntituntien välein. Kompressoreita huolletaan 2000 tunnin välein, jolloin koneisiin vaihdetaan öljyt, öljynsuodattimet, ilmansuodatin ja puhdistetaan kone liasta ja pölystä. Suodattimet ja jäähdytyskuivaimet tarkastetaan määräjain ja paineilmasäiliölle suoritetaan lakisääteiset tarkastukset 4 vuoden välein.

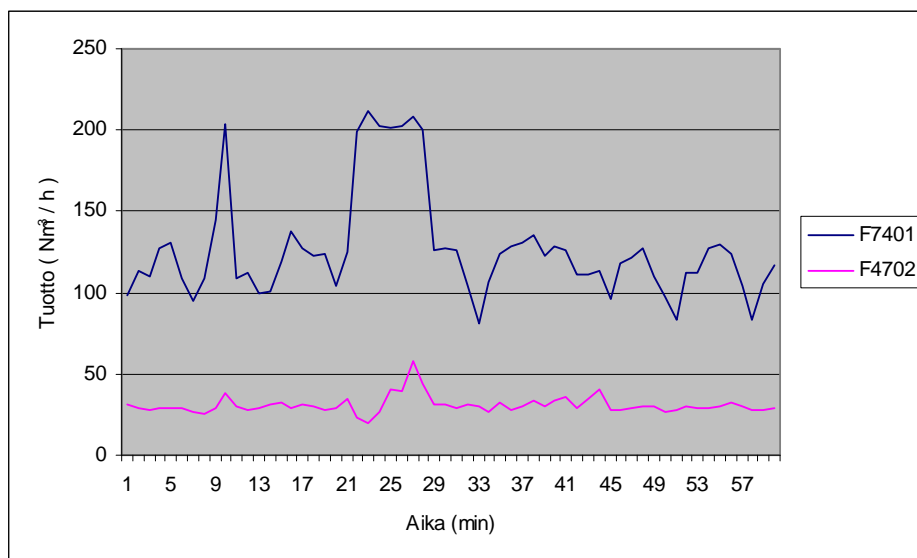
Viimeisen vuoden aikana kompressorit 1 ja 2 olivat käyneet läpi 2000 h välein tehtävän huollon. Lietteenkäsittelyn laitetilassa olevalle kompressorille 3 tämä huolto oli edessä vuonna 2010. Jäähdytyskuivaimista viime vuonna oli huollettu lietteenkäsittelyn laitetilän kuivain. Näiden kolmen huollon lisäksi paineilman tuottamiseen tai käsittelyyn osallistuville laitteille ei tehty muita huoltoja tai korjauksia. Ylläpitokustannukset olivat viime vuonna yhteensä 1466 €, josta varaosien osuus oli 1046 € ja henkilötuntien 420 €.

Laitoksen sähköenergian kulutus katetaan energia-asemalla olevilla viidellä kaasumootorilla ja ostosähköllä. Sähköenergian kulutuksesta noin puolet pystytään kattamaan omalla tuotannolla. Energiakustannuksia määritettäessä sähköön hintana käytettiin ostosähköön hintaa. Sähkön hinta oli 5,31 c kW/h, jonka lisäksi siirrosta maksettiin 2,0 c kW/h. Työilman tuottamiseen kului laitoksella energiaa vuodessa 220,3 MW/h, joten energiakustannuksiksi saatiin 15 774 €/a. Koko järjestelmän käyttökustannukset olivat noin 17 240 €/a. Liitteessä 9 on esitetty ylläpito-, energia- ja käyttökustannusten tarkat laskelmat.

6 YHTEENVETO

6.1.1 Virtausmittauksen toteutus

Yksi tämän opinnäytetyön tavoitteista oli paineilmajärjestelmän mittausten kehittäminen, niin että laitoksen työilman tuotto ja kulutuksen jakautuminen saataisiin selville. Työilman kulutuksen selvittämiseksi järjestelmään hankittiin ja asennettiin kaksi virtausmittaria. Mittausperiaatteeksi valittiin terminen massavirtausmittaus. Tätä raporttia kirjoitettaessa virtausmittarit ovat jo käytössä ja laitteiden on todettu toimivan toivotulla tavalla. Kuvassa 14 on esitetty paineilmakeskuksessa ja käytävällä E7 olevien virtausmittareiden mitaustulokset tunnin ajalta. Kuvaajassa ei käytetä mittareista saatavia todellisia arvoja vaan yhden minuutin keskiarvoa.



Kuva 14. Kuvaajan sininen käyrä kuvaa paineilman tuottoa ja purppura kulutuksen jakautumista.

Paineilmakeskukseen sijoitetun mittarin avulla saadaan selville laitoksen paineilman kokonaistuotanto. Keskimääräisestä tuotosta ei vielä ole saatu tarkkoja tuloksia johtuen mittareiden vähäisestä käyttöajasta, mutta suuntaa antavaa tietoa on jo käytettävissä. Tällä hetkellä keskimääräinen tuotto on ollut noin 140 Nm³/h. Paineilmakeskuksen mittauksen avulla on saatu myös käsitystä kompressoreiden 1 ja 2 ruuviyksiköiden kunnosta. Kompressoreiden käydessä tuotolla on virtaus vaihdellut 200 - 210 Nm³/h, mikä on lähellä valmistajan lupaamaa tuottoa, joten kompressoreiden voidaan olettaa olevan vielä hyvässä kunnossa.

Vesiasema ja suodatinlaitos käyttävät noin 25 % laitoksella tuotetusta ilmast. Käytävälle E7 asennetun mittarin mittaustuloksista on myös havaittu verkostossa olevan vuotoja vesiaseman ja suodatinlaitoksen prosessialueella. Mittaustulosten perusteella voidaan olettaa vuotoihin kuluvan ilmaa noin 10 - 15 Nm³/h, joka on noin 10 % paineilman kokonaistuotannosta tunnin aikana. Virtaus voi vaikuttaa pieneltä, mutta täytyy muistaa että mittauksen takana on vain puolet laitoksesta. Oletetaan että laitoksen muilla prosessialueilla vuodot olisivat yhtä suuret kuin vesiasemalla ja suodatinlaitoksella, niin vuotoihin kuluisi 20 - 30 Nm³/h. Vuotojen voidaan olettaa olevan vielä suurempia muilla prosessialueilla, koska niillä käytetään myös enemmän ilmaa.

6.1.2 Kokonaistalous

Opinnäytetyön toinen tavoite oli selvittää työilman tuottamisen käyttökustannukset, jotka siis koostuivat energia- ja ylläpitokustannuksista. Energiakustannusten selvittämiseksi suoritettiin tarvittavat mittaukset ja ylläpitokustannuksien selvittäminen tehtiin laitoksen kunnossapidon toiminnanohjausjärjestelmän avulla.

Laitoksen työilman tuottamisen energiakustannukset koostuivat pääasiassa kolmen kompressorin ja kahden jäähdytyskuivaimen sähkön kulutuksesta. Energiakustannukset olivat noin 15 774 € vuodessa, joka oli huomattavasti pienempi summa kuin aluksi odotettiin. Ylläpitokustannukset jäivät myös odotettua pienemmiksi. Koko järjestelmän käyttökustannukset olivat noin 17 240 €/vuodessa. Kustannukset eivät ole suuria, mutta niitä on kuitenkin mahdollista vielä pienentää. Etenkin energiakustannuksia voitaisiin mahdollisesti pienentää muuttamalla kompressoreiden ohjausta.

Mittausten ja käyntiaikatietojen tarkastelun yhteydessä huomattiin, että kompressoreiden ohjauksessa oli aihetta kehittämiseen. Kompressorit kävivät huomattavan paljon kevennyksellä. Kevennyksellä käydessään kompressori ei tuota ilmaa, mutta on kuitenkin käynnissä ja kuluttaa energiaa. Asentamalla kompressoreihin taajuusmuuttajat voitaisiin koneiden käyntiä ohjata paineen lisäksi kompressorin kierrosnopeudella. Kierrosnopeutta säättämällä saataisiin verkoston painetaso tasaisemmaksi ja kompressoreiden tuotolla kuluttamaa sähkötehoa pienentymään, eikä kompressori näin putoaisi käymään lainkaan kevennyksellä. Tämän työn puitteissa taajuusmuuttajien käyttöön kompressoreiden ohjauksessa ei perehdytty ideointia pidemmälle.

VIITELUETTELO

- [1] Helsingin Vesi Viikinmäen Jätevedenpuhdistuslaitos. Toimintasuunnitelma. 2008.

- [2] Elman, Asko ym., Pneumatiikka. Edita: Helsinki. 2002.

- [3] Tamrotor Kompressorit Oy. Tietoja Paineilmajärjestelmän Suunnittelijalle. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 10.2.1010]. Saatavissa: http://www.compressor.fi/www/media/EsitePDF/Paineilmajarjestelmien_suunnittelu.pdf

- [4] Ekomak Kompressoren GmbH. Technical Data. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 10.2.1010]. Saatavissa: <http://www.ekomak.com.tr/sayfalar.php?id=17&dil=en>

- [5] Tamrotor Kompressorit Oy. Ruuvikompressori ES 18, ES 22, ES 30, ES 37 Käyttö- ja huolto-ohjeet. Gardner Denver Oy: Tampere. 1999.

- [6] Oy Atlas Copco Ab. Ohjekirja kiinteille kompressoreille GA11-GA22. Atlas Copco: 1988.

- [7] Räsänen, Jouko, Automaatiotekniikan mittauksia. Painatuskeskus Oy: Helsinki. 1994.

- [8] Pihkala, Juhani, Prosessisuureiden mittaustekniikka. Edita: Helsinki. 2000.

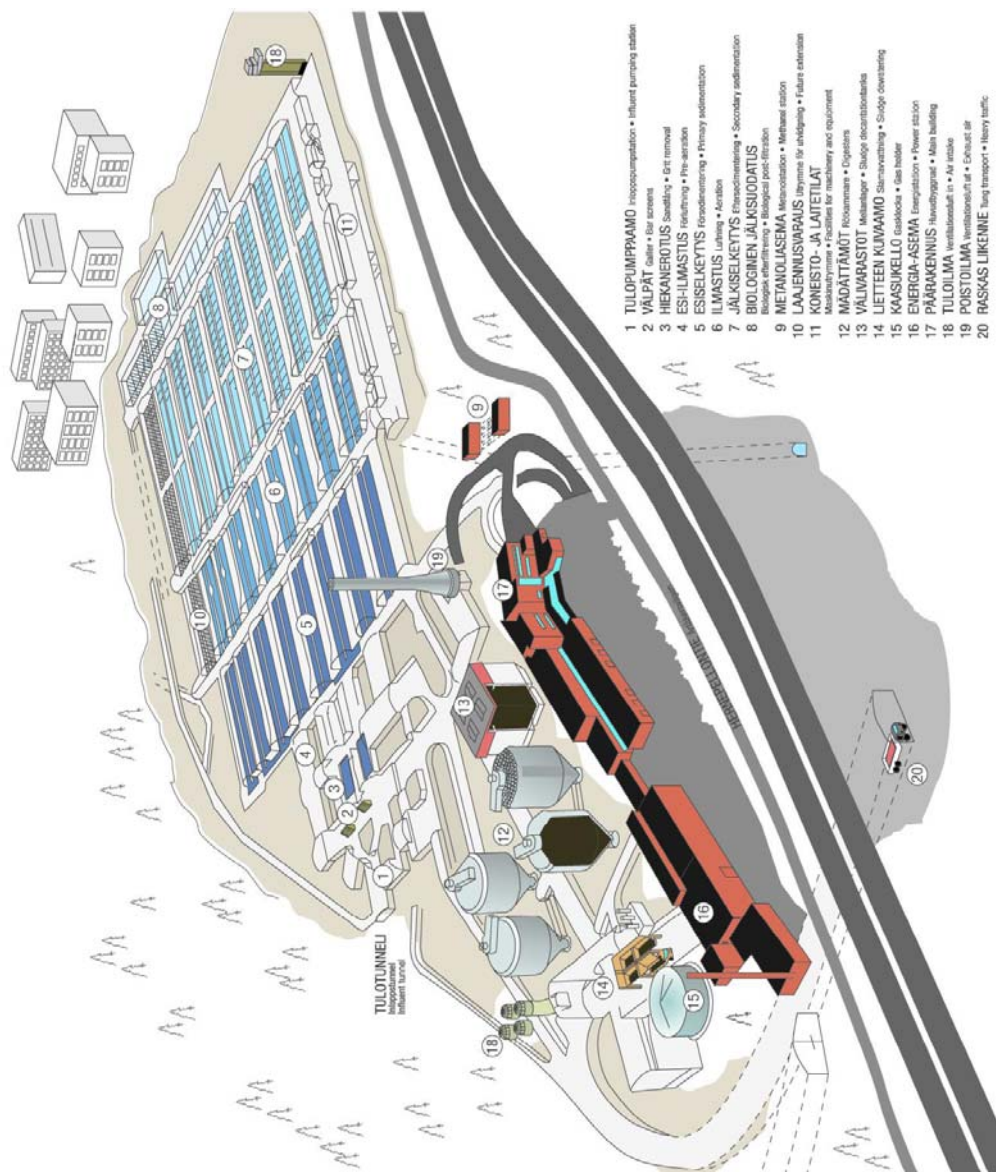
- [9] Luotsinen, Osmo, Prosessisuureiden anturit. Insinööritieto Oy: 1983.

- [10] Airila, Mauri, ym. Hydor: Kompressorikirja. Korpivaara Oy Hydor Ab: Vantaa. 1983.

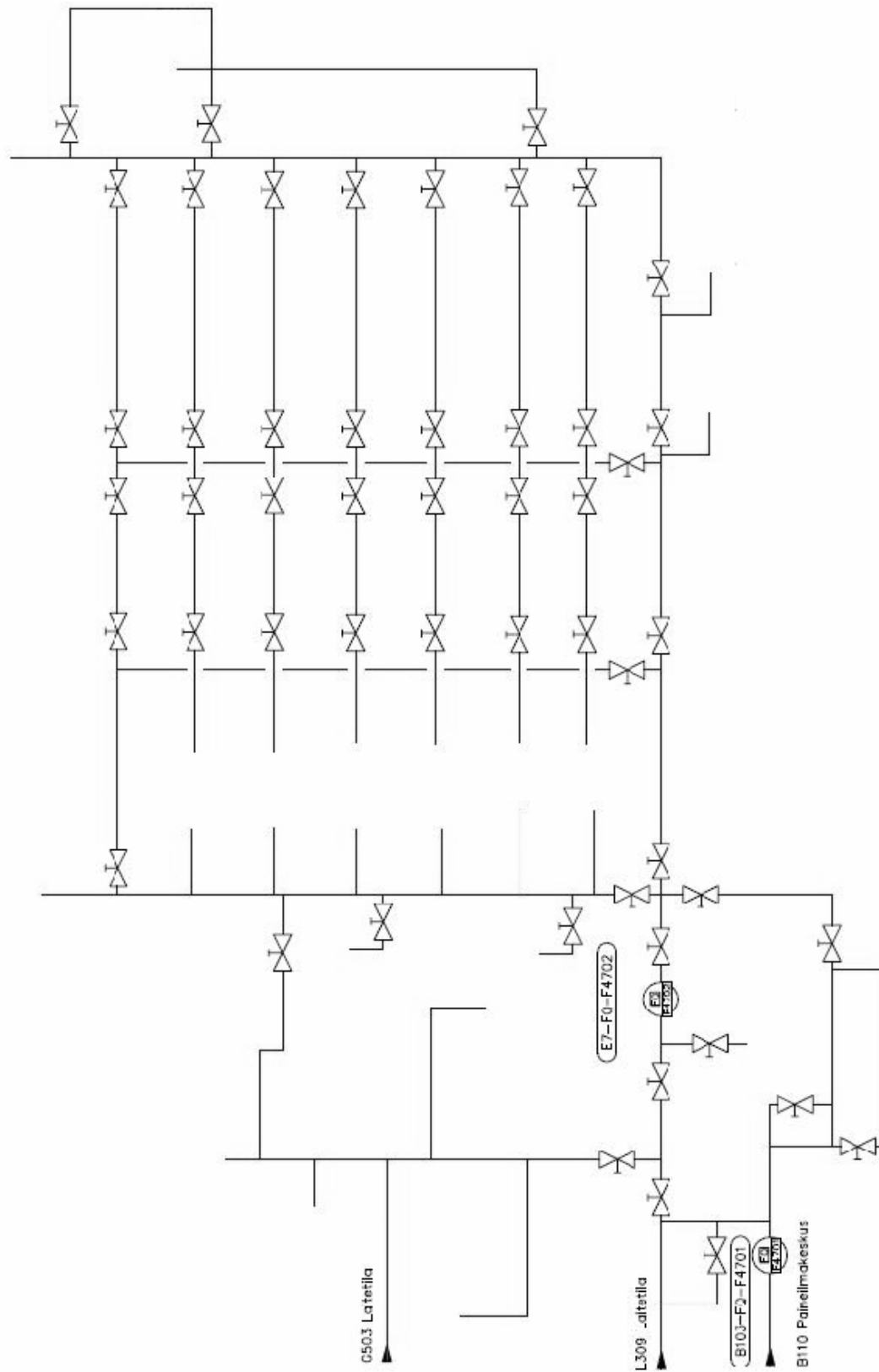
- [11] Improving Compressed Air System Performance, U.S Department of Energy [Verkkodokumentti]. Washington. [Viitattu 11.3.2010]. Saatavissa: http://www1.eere.energy.gov/industry/bestpractices/pdfs/compressed_air_sourcebook.pdf
- [12] Description of Device Functions Proline t-mass 65F, 65I Termal Mass Flow Measuring System. Operation Manual. Metso Endress+Hauser.
- [13] Pesonen Jani, Paperitehtaan paineilmatuotannon energiatalouden tutkiminen. Insinöörityö. Helsingin ammattikorkeakoulu. Helsinki. 2006.

JÄTEVEDENPUHDISTUSLAITOKSEN KARTTA

Viikinmäen jätevedenpuhdistamo Avioopsreningsverk • Wastewater treatment plant



PAINEILMAVERKON RAKENNE



KOMPRESSOREIDEN TEKNISET TIEDOT

1 KOMPRESSOREIDEN 1 JA 2 TEKNISET TIEDOT

| F37- Enduro 220/380/415/660V 50Hz | | 8 | 10 |
|--------------------------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|
| Tuotto ja tehon tarve | | | |
| Normaali työpaine | bar | 7 | 9 |
| Tuotto normaalilla työpaineella | m ³ /min | 5,90 | 5,35 |
| Akseliteho norm.työpaineella | kW | 37,9 | 37,9 |
| Max.työpaine | bar | 8 | 10 |
| Tuotto max.työpaineella | m ³ /min | 5,85 | 5,30 |
| Min.työpaine | bar | 3 | 3 |
| Akseliteho tyhjäkäynnillä | kW | 9,2 | 8,4 |
| Ruuviroottorin pyörimisnopeus | rpm | 5260 | 4830 |
| Jäähdytys | | | |
| Jäähdytysväliaine | A/W | ilma/vesi | ilma/vesi |
| Max.ympäristön lämpötila | ° C | 40 | 40 |
| Lähtevän paineilman Δt | A/W | 7/5 | 7/5 |
| Ilmajäähdytteinen | | | |
| Jäähdytysilmavirta | m ³ /s | 1,9 | 1,9 |
| Jäähdytysilman kanavointi | mm | 600x680 | 600x680 |
| Max.jäähdytysilman painehäviö | Pa | 60 | 60 |
| Jäähdytysilman lämpötilan nousu | ° C | 16 | 16 |
| Vesijäähdytteinen | | | |
| Jäähdytysveden virtaus | l/s | 0,15 | 0,15 |
| Sisääntulovesi/ulostulovesi | ° C | 15/65 | 15/65 |
| Minimipaine | bar | 1,5 | 1,5 |
| Vesiliitännät | | R ³ /4 ulko | R ³ /4 ulko |
| Öljyjäähdyttimen lämpöteho | kW | 30 | 30 |
| Jälkijäähdyttimen lämpöteho | kW | 6 | 6 |
| Sähkömoottori | | | |
| Päämoottori:F- luokka, IP 54 | kW | 37 | 37 |
| Nimellispyörimisnopeus | rpm | 3000 | 3000 |
| Sulake(max.) (380/660V) | A | 125/80 | 125/80 |
| Max.virta (380/660V) | A | 80/47 | 80/47 |
| Yleiset tekniset tiedot | | | |
| Öljymäärä | l | 12 | 12 |
| Paineilmaliitäntä | | R1 ¹ /4 ulko | R1 ¹ /4 ulko |
| Melutaso | | | |
| - ilman Novox- koria | dB(A) | 82 | 82 |
| - Novox- korilla | dB(A) | 74 | 74 |
| Kompressorin paino | | | |
| - ilman Novox- koria | kg | 545 | 545 |
| - Novox- korilla | kg | 592 | 592 |
| Mittapiirustus | | 3- 035 758 | 3- 035 758 |

2 KOMPRESSORIN 3 TEKNISET TIEDOT

| 230/400/690V 50Hz | | ES 22-7,5 | ES 22-10 |
|--|---------------------|-----------|-----------|
| Tuotto ja tehon tarve | | | |
| Normaali työpaine | bar | 7,0 | 9,0 |
| Tuotto normaalilla työpaineella | m ³ /min | 3,45 | 2,90 |
| Akseliteho norm. työpaineella | kW | 22,8 | 22,3 |
| Max. työpaine | bar | 7,5 | 10,0 |
| Min. työpaine | bar | 3,0 | 3,0 |
| Akseliteho tyhjäkäynnillä | kW | 5,8 | 5,0 |
| Välitys: | | hihna | hihna |
| Jäähdytys | | | |
| Sallittu ympäristön lämpötila | °C | 0 – 40 | 0 – 40 |
| Lähtevän paineilman lämpötilaero | °C | 10 | 10 |
| Himajäähdytteinen kompressor | | | |
| Jäähdytysilmavirta | m ³ /s | 1,50 | 1,50 |
| Jäähdytysilman max. painehäviö | Pa | 60 | 60 |
| Jäähdytysilman lämpötilan nousu | °C | 11 | 11 |
| Vesijäähdytteinen kompressor | | | |
| Jäähdytysveden virta | l/s | 0,16 | 0,16 |
| Vesi sisään / vesi ulos | °C | 20/50 | 20/50 |
| Minimipaine | bar | 1,5 | 1,5 |
| Öljynjäähdyttimen lämpöteho | kW | 17,0 | 17,0 |
| Jälkijäähdyttimen lämpöteho | kW | 3,5 | 3,0 |
| Sähkömoottori | | | |
| Päämoottori: F-luokka, IP55 | kW | 22,0 | 22,0 |
| Kierrosluku | rpm | 2935 | 2935 |
| Tuuletinmoottori | kW | | |
| Kierrosluku | rpm | | |
| Sulakkeet 230/400/690V | A | 100/63/35 | 100/63/35 |
| Virta 230/400/690V | A | 71/41/24 | 71/41/24 |
| Ohjausjännite | V | 230/24 | 230/24 |
| Yleiset tekniset tiedot | | | |
| Öljymäärä | l | 11,0 | 11,0 |
| Öljypitoisuus | mg/m ³ | 2 | 2 |
| Kompressorin melu (Cagi Pneurop PN8NTC2.2, ±3dB) | | | |
| korilla | dB(A) | 77 | 77 |
| lisä-äänenvaimentimella | dB(A) | 67 | 67 |
| Kompressorin paino | | | |
| korilla | kg | 628 | 628 |
| lisä-äänenvaimentimella | kg | 700 | 700 |

3 KOMPRESSORIN 4 TEKNISET TIEDOT

6.4 Kompressorin tiedot, 50 Hz yksiköt 1)

| Kompressorin tyyppi | | GA11-7.5 | GA15-7.5 | GA15-10 | GA18-7.5 | GA18-10 |
|---|-------|----------|----------|---------|----------|----------|
| Puristusvaiheita | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Suurin kevennyspaine (e) | bar | 7.5 | 7.5 | 10 | 7.5 | 10 |
| Normaali työpaine | bar | 7 | 7 | 9.5 | 7 | 9.5 |
| Pienin työpaine (e) | bar | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Jäähdytysjärjestelmä | | air | air | air | air | air |
| Suurin sallittu tulo-ilman lämpötila | °C | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 |
| Kompressoriyksiköltä lähtevän paineilman lämpötila ulosotto-venttiilillä nimellisolosuhteissa | °C | 32 | 33 | 35 | 34 | 35 |
| Öljytilavuus | l | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Moottorin kierrosluku | r/min | 1450 | 1455 | 1455 | 1460 | 1460 |
| Moottori Asea, tyyppi MBT | | 160 M-4 | 160 L-4 | 160 L-4 | 160 LA-4 | 160 LA-4 |
| Pituus | mm | 1118 | 1118 | 1118 | 1118 | 1118 |
| Leveys | mm | 792 | 792 | 792 | 792 | 792 |
| Korkeus | mm | 970 | 970 | 970 | 970 | 970 |
| Nettopaino noin | kg | 415 | 425 | 425 | 435 | 435 |

1) Nimellisolosuhteissa:

- Ilmailman absoluuttinen paine 1 bar
- Ilmailman lämpötila 20°C
- Normaali työpaine: 7 bar GA11...22-7.5
9.5 bar GA15...22-10

TERMINEN MASSAVIRTAUSMITTARI PROLINE T-MASS 65I**1 VIRTAUSMITTAREIDEN UPOTUSSYVYYDEN LASKEMINEN**

Paineilmakeskuksen tuleva mittari asennettiin DN 80 kokoiseen putkeen. Putken seinämän paksuudeksi mitattiin 2 mm, sisähalkaisijaksi 112 mm ja asennuksessa käytetyn venttiilin pituus oli 160 mm.

$$(0,3 \times 112mm) + 2mm + 160mm + 2mm \quad (1)$$

Mittarin upotussyvyyden laskettiin olevan 197 mm. Käytävälle E7 tuleva mittari asennettiin DN 65 kokoiseen putkeen. Putken seinämän paksuudeksi mitattiin 2 mm ja sisähalkaisijaksi 85 mm.

$$(0,3 \times 85mm) + 2mm + 160mm + 2mm \quad (1)$$

Toisen virtausmittarin upotussyvyydeksi saatiin 189,5 mm.

2 VIRTAUSMITTAREIDEN TEKNISET TIEDOT

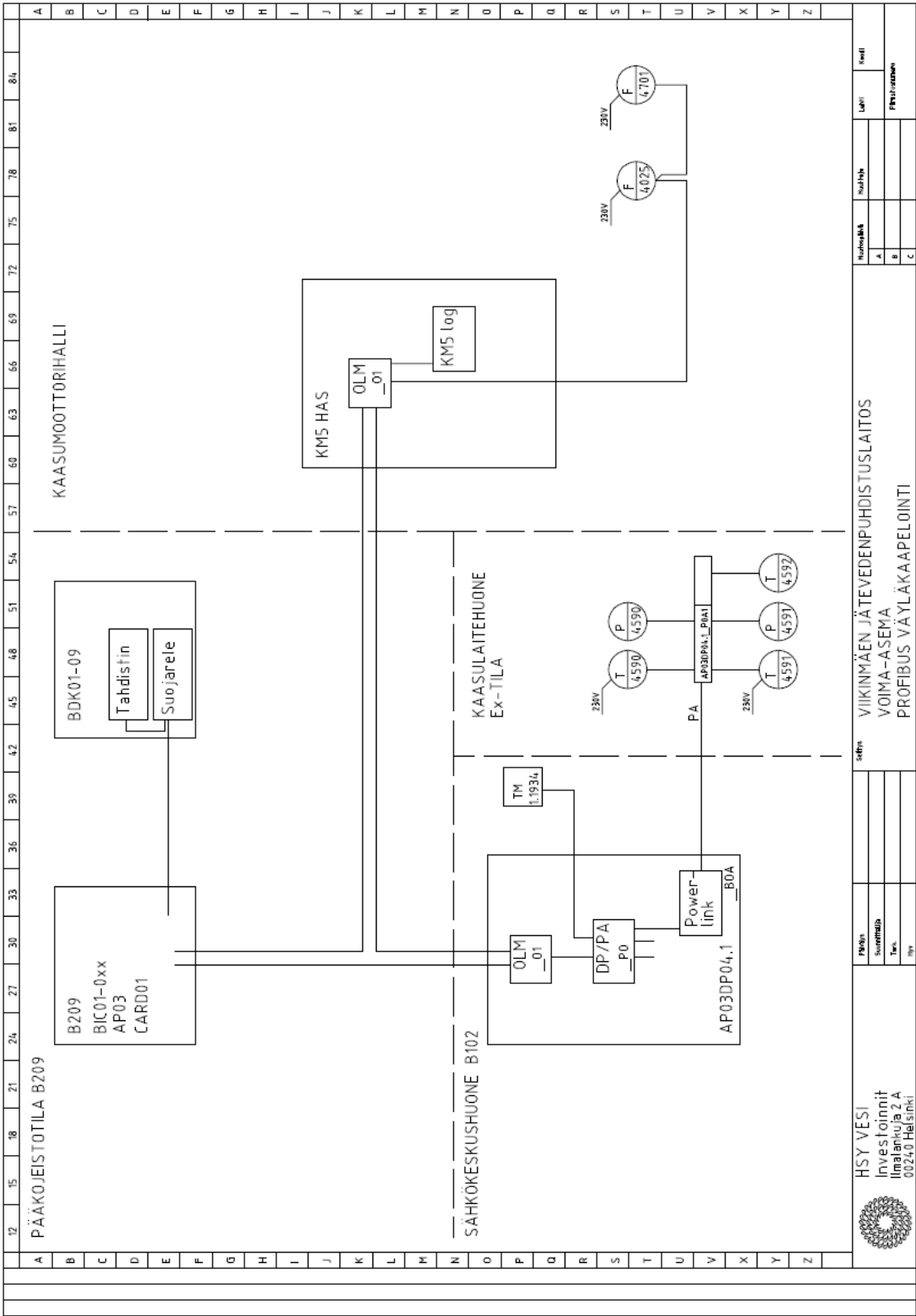
Taulukko 1. Käytävälle E7 sijoitetun virtausmittarin tekniset tiedot

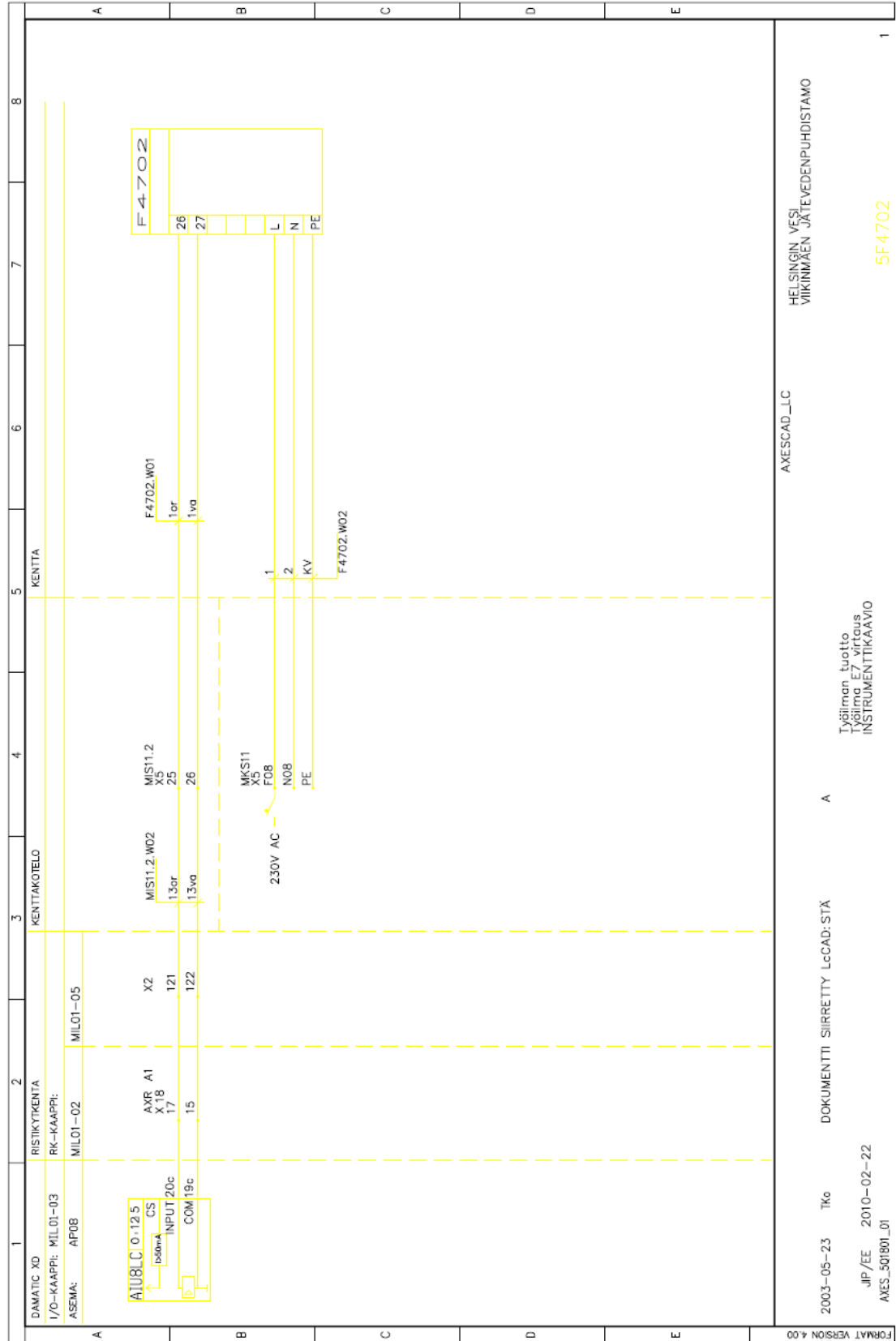
| | |
|----------------------------------|--------------------------------------|
| Type: (x1) | 65I-20AB1AD1AAAACA |
| Insertion Tube Length: | 235 mm 9" |
| Material Insertion Tube; Sensor: | Stainl. Steel; Stainl. Steel |
| Process Connection: | G 1 A, thread ISO 228, Stainl. Steel |
| Seal: | PEEK, Nitrile, -35...+130 °C |
| Surface Finishing: | Basic version |
| Calibration: | Factory calibration |
| Housing: | Compact Alu, IP67 NEMA4X |
| Cable Entry: | Gland M20 (EEx d > thread M20) |
| Display; Operation: | 85-260VAC, 2-line + push buttons |
| Output, Input: | 4-20mA HART + frequency |
| Min. internal diameter: | 59Millimeter |
| Max. internal diameter: | 3000Millimeter |
| Min. process pressure: | 0.5bar |
| Max. process pressure: | 21bar |
| Min. reference temperature: | 0 °C |
| Max. reference temperature: | 27 °C |
| Min. reference pressure: | 1bar |
| Max. reference pressure: | 1.02bar |
| Min. upper range value: | 0Nm3/h |
| Max. upper range value: | 9999999Nm3/h |





Taulukko 2. Paineilmakeskus B110 sijoitetun virtausmittarin tekniset tiedot

| | |
|---|------------------------------------|
| Type: (x1) | 65I-20AB1AD1AAAACJ |
| Insertion Tube Length: | 235 mm 9" |
| Material Insertion Tube; Sensor: | Stainl. Steel; Stainl. Steel |
| Process Connection: | G 1 A, thread ISO 228, |
| Seal: | PEEK, Nitrile, -35...+130 °C |
| Surface Finishing: | Basic version |
| Calibration: | Factory calibration |
| Housing: | Compact Alu, IP67 NEMA4X |
| Cable Entry: | Gland M20 (EEx d > thread M20) |
| Display; Operation: | 85-260VAC, 2-line + push buttons |
| Adjustment; Software Feature: | Standard gas; 1x Group |
| Output, Input: | PROFIBUS DP |
| Min. internal diameter: | 59Millimeter |
| Max. internal diameter: | 3000Millimeter |
| Min. process pressure: | 0.5bar |
| Max. process pressure: | 21bar |
| Min. reference temperature: | 0 °C |
| Max. reference temperature: | 27 °C |
| Min. reference pressure: | 1bar |
| Max. reference pressure: | 1.02bar |
| Process pressure: | 6bar a |
| Reference temperature: | 20 °C |
| Reference pressure: | 1.0132bar a |
| Unit corrected volume flow: | Nm3/hNm3/h |
| Analog input function block 1 - chanel: | Mass flowMass flow |
| Analog input function block 2 - chanel: | Corr. volume flowCorr. Volume flow |
| Analog input function block 3 - chanel: | Temperature Temperature |

VIRTAUSMITTAREIDEN KYTKENNÄT








| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|----------------------|--|----------|------|----------|---------|--|----------------------|--|---------|----------|---------|----|------------------|-----------------|------------|--|-------|--|----|-----------|------|----|------|---|---|---|---|----|
| <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">Nimi pr: 5F4702.F</td> </tr> <tr> <td style="width: 50%;">Sijainti</td> <td style="width: 50%;">AP08</td> </tr> <tr> <td>Suoritus</td> <td>1400 ms</td> </tr> </table> | Nimi pr: 5F4702.F | | Sijainti | AP08 | Suoritus | 1400 ms | <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  20.7.5 am2 </div> <div style="text-align: center;">  20.7.5 am2 </div> <div style="text-align: center;">  am </div> <div style="text-align: center;">  am </div> </div> <div style="margin-top: 20px;"> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">Nimi pr: 5F4702.I</td> </tr> <tr> <td style="width: 50%;">Osolite</td> <td style="width: 50%;">0 :12 :5</td> </tr> <tr> <td>Mittaus</td> <td>:m</td> </tr> <tr> <td>Skala ja yksikkö</td> <td>0.0-600.0 Nm3/h</td> </tr> </table> </div> <div style="margin-top: 20px;"> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">pr: 5F4702</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">1 am2</td> </tr> <tr> <td style="width: 50%;">av</td> <td style="width: 50%;">hyst= 0.1</td> </tr> <tr> <td>6000</td> <td>hh</td> </tr> <tr> <td>6000</td> <td>h</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>l</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>ll</td> </tr> </table> </div> | Nimi pr: 5F4702.I | | Osolite | 0 :12 :5 | Mittaus | :m | Skala ja yksikkö | 0.0-600.0 Nm3/h | pr: 5F4702 | | 1 am2 | | av | hyst= 0.1 | 6000 | hh | 6000 | h | 0 | l | 0 | ll |
| Nimi pr: 5F4702.F | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Sijainti | AP08 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Suoritus | 1400 ms | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Nimi pr: 5F4702.I | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Osolite | 0 :12 :5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Mittaus | :m | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Skala ja yksikkö | 0.0-600.0 Nm3/h | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| pr: 5F4702 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 am2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| av | hyst= 0.1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6000 | hh | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6000 | h | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | l | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | ll | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |


| | |
|----------------------|---------|
| Nimi pr: 5F4702.F | |
| Sijainti | AP08 |
| Suoritus | 1400 ms |

| | |
|----------------------|-----------------|
| Nimi pr: 5F4702.I | |
| Osolite | 0 :12 :5 |
| Mittaus | :m |
| Skala ja yksikkö | 0.0-600.0 Nm3/h |


20.7.5
am2

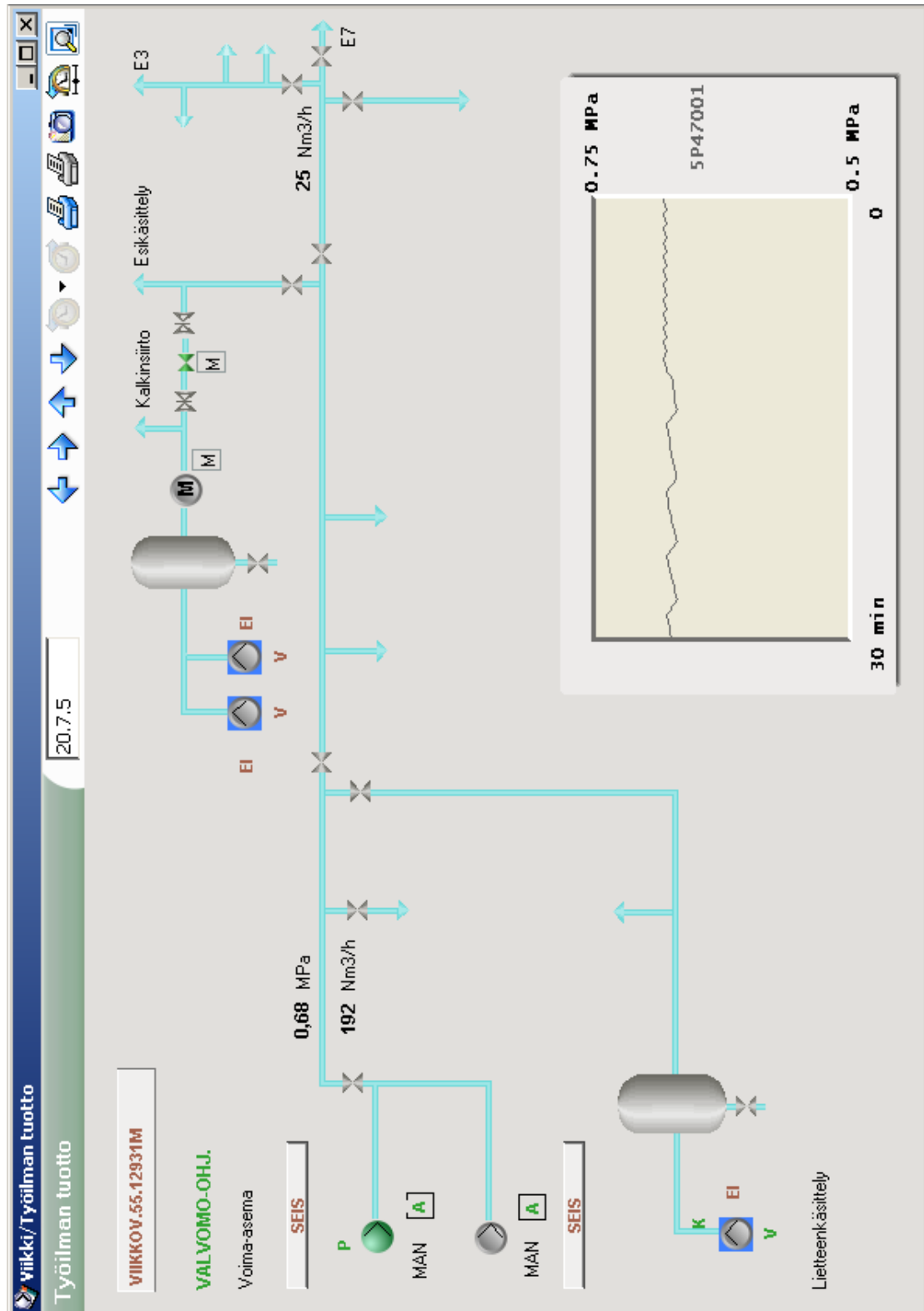

20.7.5
am2


am

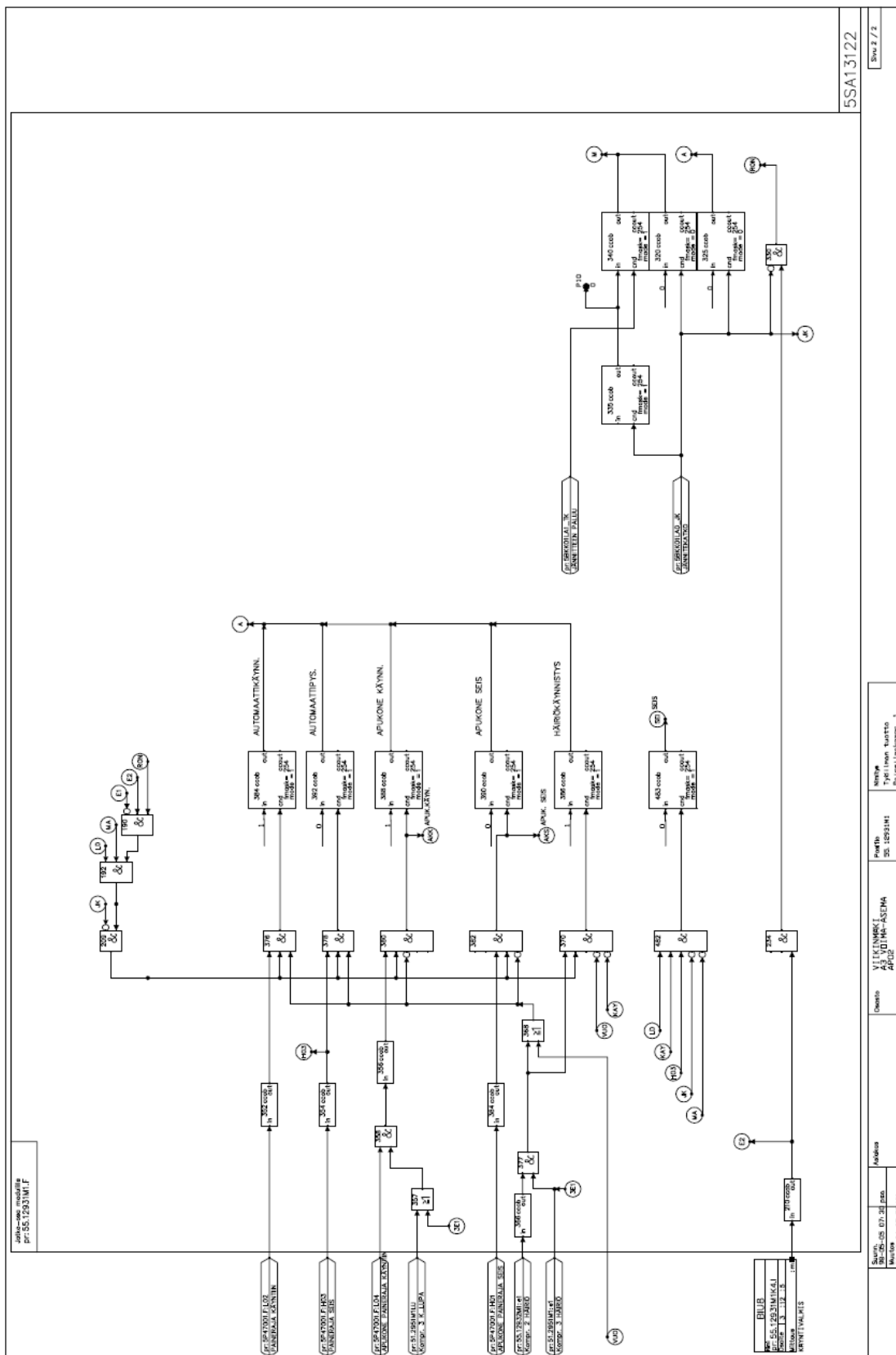

am

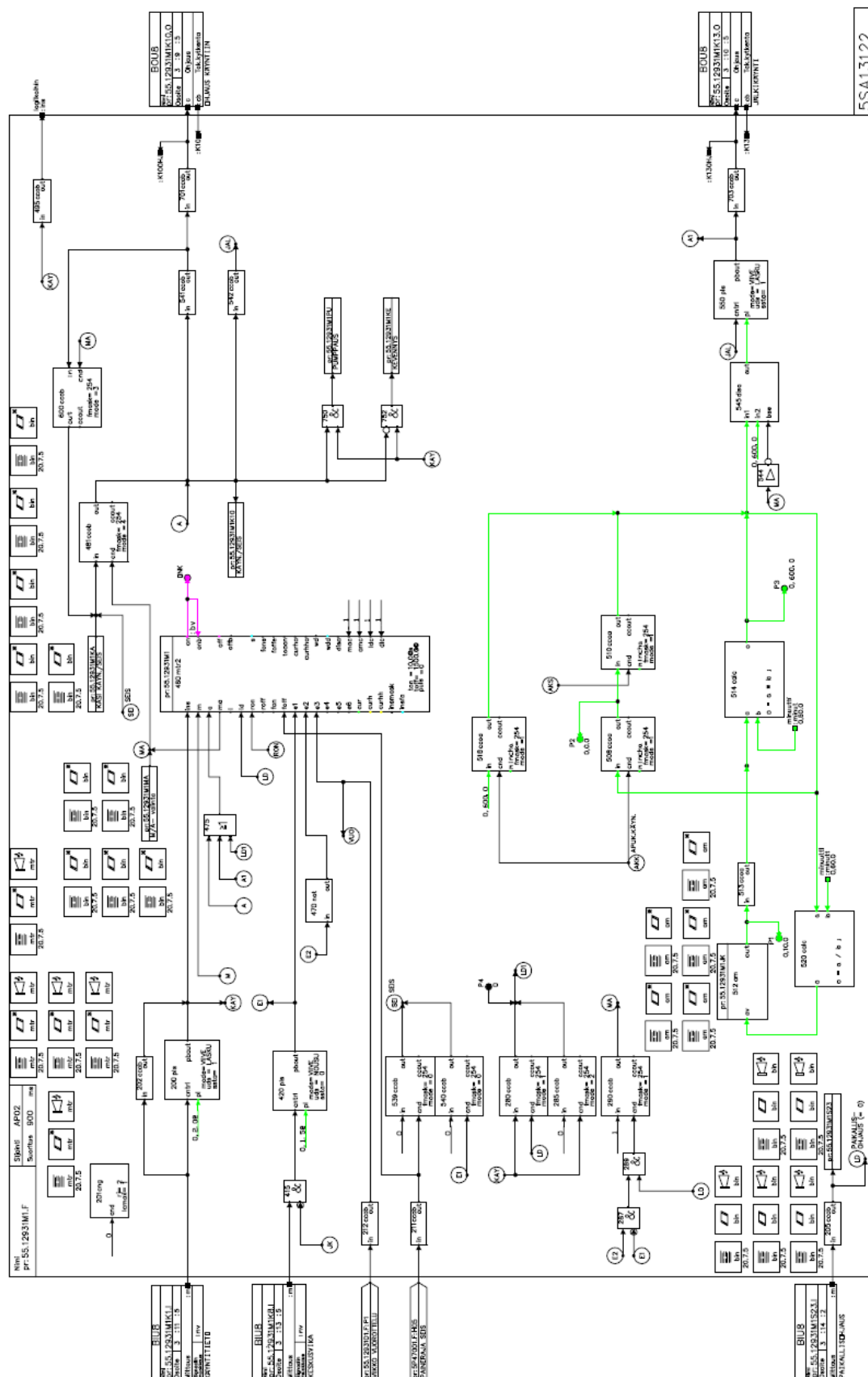
| | |
|------------|-----------|
| pr: 5F4702 | |
| 1 am2 | |
| av | hyst= 0.1 |
| 6000 | hh |
| 6000 | h |
| 0 | l |
| 0 | ll |

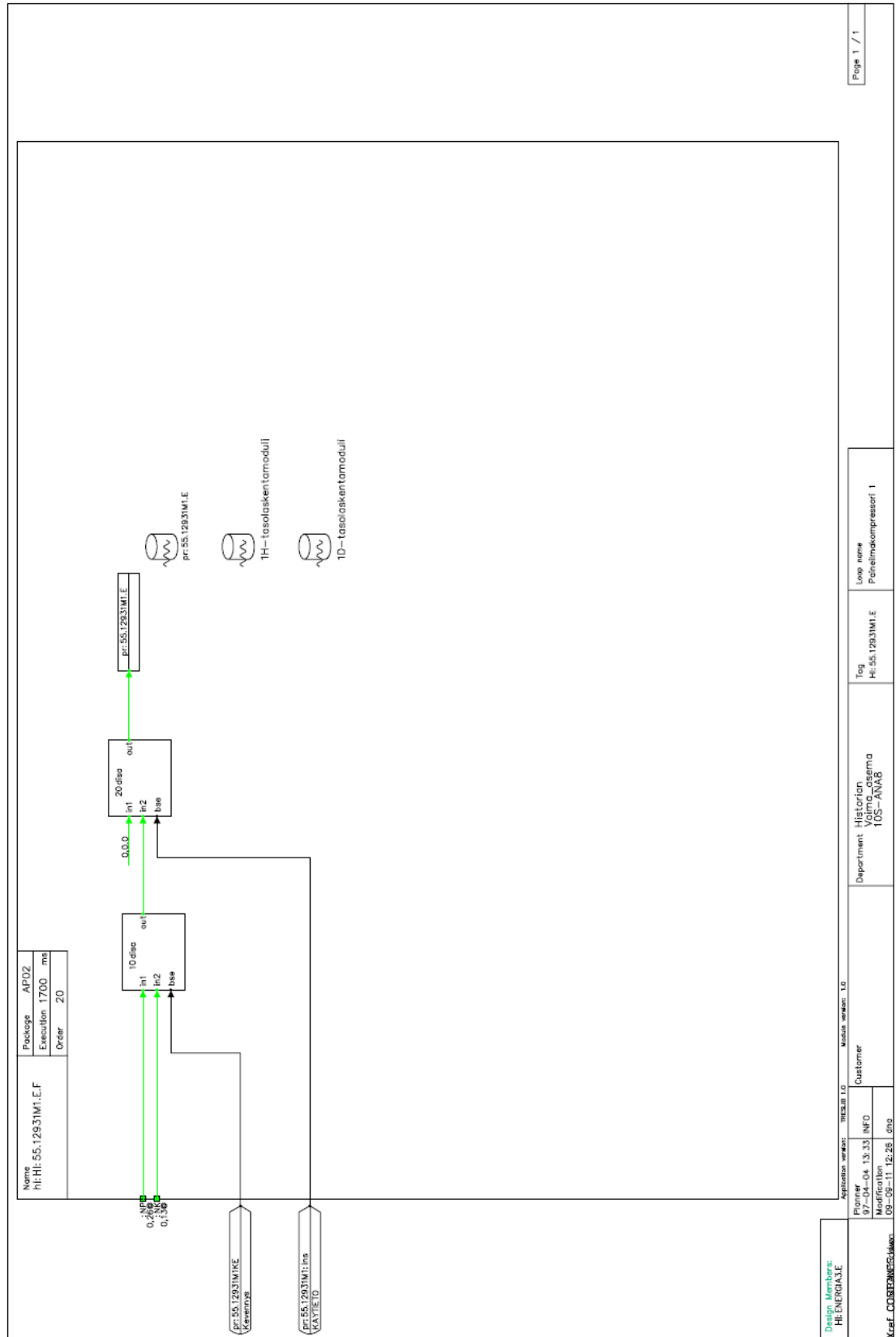
TYÖILMAN TUOTON PROSESSIKUVA



KOMPRESSORIN 1 OHJAUS







PAINEILMATUOTANNON KUSTANNUSTEN MÄÄRITTÄMINEN

Energiakustannukset

Kompressorit

| 1.1 - 31.1.2010 | Kompressori 1 | Kompressori 2 | Kompressori 3 |
|-------------------------|---------------|---------------|---------------|
| kW | 12010 | 4009 | 1539 |
| Käyntitunnit (h) | 560 | 192 | 86 |
| kW | 21 | 21 | 18 |
| 1.1.2009 - 31.12.2009 | Kompressori 1 | Kompressori 2 | Kompressori 3 |
| Käyntitunnit 2009 (h/a) | 4370 | 3434 | 1061 |
| kW/h | 93724 | 71702 | 18984 |
| 0,0731 c/kWh | 6 682,53 € | 5 112,38 € | 1 353,54 € |
| Yhteensä (€/a) | 13 148,45 € | | |

Jälkikäsittelylaitteet

Paineilmakeskus B110

| | |
|------------------|------------|
| jäähdytyskuivain | 3,00 kW |
| Käyntitunnit | 8760 h/a |
| 0,0731 c/kWh | 1 921,07 € |

Laitetila L309

| | |
|------------------|----------|
| jäähdytyskuivain | 1,1 kW |
| Käyntitunnit | 8760 h/a |
| 0,0731 c/kWh | 704,39 € |

| | |
|----------------|-------------|
| Yhteensä (€/a) | 15 773,91 € |
|----------------|-------------|

Ylläpitokustannukset

1.1.2009 - 31.12.2009

Henkilötunti 30 €/h

| Laite/Huolto | Henkilötunnit (h) | Materiaalit (€) | Kustannukset (€) |
|--------------|-------------------|-----------------|------------------|
|--------------|-------------------|-----------------|------------------|

Kompressori 1

| | | | |
|---------------------|---|--------|----------|
| Ennakkohuolto 2000h | 6 | 611,74 | 791,74 € |
|---------------------|---|--------|----------|

Kompressori 2

| | | | |
|---------------------|---|--------|----------|
| Ennakkohuolto 2000h | 4 | 435,18 | 555,18 € |
|---------------------|---|--------|----------|

Kompressori 3

Jäähdytkuivain 1 (B110)

Jäähdytkuivain 2 (L309)

| | | | |
|-------------------|---|-------|----------|
| Ennakkohuolto 6kk | 4 | _____ | 120,00 € |
|-------------------|---|-------|----------|

| | | | |
|----------------|--|--|------------|
| Yhteensä (€/a) | | | 1 466,92 € |
|----------------|--|--|------------|

Kokonaiskustannukset

1.1.2009 - 31.12.2009

| | |
|---------------------|-------------|
| Energiakustannukset | 15 773,91 € |
|---------------------|-------------|

| | |
|----------------------|------------|
| Ylläpitokustannukset | 1 466,92 € |
|----------------------|------------|

| | |
|----------------|-------------|
| Yhteensä (€/a) | 17 240,83 € |
|----------------|-------------|